



Tiago Amorim Simões de Paiva

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Estudo de colunas circulares de betão reforçadas com compósitos de fibra de carbono

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Rui Pedro César Marreiros
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Coorientador: Professor Doutor Paulo Silva Lobo
Professor Auxiliar, FCEE da Universidade da Madeira

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida, FCT-UNL

Arguente: Professor Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues, FCT-UNL

Vogal: Professor Doutor Rui Pedro César Marreiros, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2020

Estudo de colunas circulares de betão reforçadas com compósitos de fibras de carbono

Copyright © Tiago Amorim Simões de Paiva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer a todos os que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e académico no seio da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Instituição que graças ao seu corpo docente, não docente e associados, me permitiu adquirir capacidades e competências para um ingresso no mercado laboral.

Ao Professor Rui Marreiros agradeço pela orientação prestada neste trabalho, por toda a ajuda, conhecimento científico transmitido, revisão crítica e pelas inúmeras conversas que tivemos quando surgiam os mais variados problemas, sempre à procura da melhor solução. Ao Professor Paulo Lobo, coorientador deste trabalho, agradeço o contributo científico, revisão crítica e interesse no trabalho desenvolvido.

Agradeço ao Engenheiro Vítor Silva por toda a experiência e conhecimentos partilhados, pelas soluções que arranjou para pequenos contratempos que surgiram e também pela realização dos ensaios de resistência da argamassa. Agradeço igualmente aos Técnicos Jorge Silvério e José Gaspar por toda a ajuda prestada no laboratório, em todas as tarefas, e ainda pela amizade, boa disposição e boa vontade. Deixo também uma palavra de agradecimento ao Doutor Brisid, pelo auxílio na realização de todos os ensaios experimentais no laboratório de Estruturas Pesadas.

À empresa *Concremat*, em particular aos Engenheiros Romeu Reguengo e David Martins, pela confeção e cedência das armaduras utilizadas no presente trabalho.

À empresa *S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda.* na pessoa da Engenheira Joana Pereira, agradeço toda a disponibilidade, prontidão, esclarecimento de questões técnicas e fornecimento de todo o material de reforço utilizado na campanha experimental.

Aos rapazes da anTUNiA, com quem tive o privilégio de entrar no mundo da música. Os seus ensinamentos são imensuráveis bem como as amizades, experiências e momentos vividos. Deste grupo de pessoas espetaculares, a quem tenho muito a agradecer, destaco o Gonçalo “Lavadinho” Vília, que me acompanhou de perto e que demonstrou uma preocupação sem igual para comigo, mostrando de que é feito o seu povo alentejano.

Aos meus afilhados Pedro Cravinho, Gonçalo Lima, Renato Oliveira e em especial, ao Bruno Vilarinho que realizou a dissertação a par comigo, ainda que num tema diferente, e que foi um exemplo fundamental nesta fase final, por toda a sua perseverança, foco e determinação.

A todas as pessoas incríveis que conheci neste curso, desde os mais novos aos mais velhos, que tornaram a caminhada mais fácil, das quais destaco Bruno Fernandes, Rafael Serra, Roberto Carvalho, André Saraiva, Nuno Ribeiro, Alexandre Ferrão, Leandro Gomes, Miguel Pires, Manuel Gomes, Gonçalo Freitas, Daniel Madeira, João Baixinho, Bruno Jorge, Igor Varagilal, Mafalda Coradinho e aos meus padrinhos João e Catarina.

À minha namorada, Catarina, fica o agradecimento por tudo o que aguentou comigo, todas as frustrações, angústias e dúvidas, mas também as pequenas vitórias e conquistas deste processo. O seu apoio, preocupação, carinho e ombro amigo, mas sobretudo o seu inconfundível riso nervoso com que encara o dia-a-dia, não obstante das dificuldades que enfrenta, foram uma força de inspiração sem os quais tudo seria bastante mais árduo. Foste sem dúvida o melhor que a faculdade me deu, um muito obrigado.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus pais que me proporcionaram a oportunidade de tirar um curso superior e que me deixaram aproveitar esta experiência. Não foram fáceis estes anos, houve muitos altos e baixos, mas sempre me apoiaram incondicionalmente, apesar de todas as falhas. Lutaram para me dar o melhor, sem pedir nada de volta. Estou-vos eternamente grato, o meu mais sincero obrigado, sem vocês era realmente impossível.

RESUMO

A reabilitação de edifícios é uma prática cada vez mais comum no seio da Engenharia Civil. Por esta razão torna-se imprescindível a procura de novas técnicas e métodos de reforço capazes de integrar construções já existentes. Nesse sentido, desenvolveu-se um estudo experimental sobre o confinamento de pilares de betão, de secção circular, com recurso a uma argamassa reforçada por uma malha têxtil unidirecional de fibras de carbono.

O principal objetivo deste trabalho é fazer uma caracterização do CFRCM (*Carbon Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) enquanto sistema de confinamento. Os compósitos de fibras, nomeadamente os CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), têm uma grande procura no mercado da construção porém apresentam algumas desvantagens que podem ser colmatadas por esta técnica inovadora que combina os compósitos com uma matriz inorgânica.

A campanha experimental compreendeu a realização de ensaios de compressão uniaxial até à rotura de doze modelos, dos quais dois diziam respeito a modelos de referência que não foram reforçados. Relativamente aos modelos reforçados, estes dividem-se em duas séries, uma reforçada com tecidos de fibras de carbono a outra com argamassa reforçada com malha têxtil de fibras de carbono. Em ambas as séries fez-se variar o número de camadas. A aplicação do reforço foi feita em toda a altura dos pilares, com os tecidos de fibras e a malha têxtil orientadas na direção transversal dos pilares.

Analisaram-se os resultados experimentais, mediante vários parâmetros que caracterizam o comportamento do betão confinado à compressão. Para ambos os reforços, foi possível aumentar a força máxima de compressão do betão e a correspondente extensão axial. O reforço de CFRCM apresentou algumas vantagens, nomeadamente a sua resposta pós pico, que suporta grandes deformações até perder toda a sua capacidade resistente e também a facilidade na aplicação do reforço face ao CFRP.

Palavras Chave:

Pilares de betão, secção circular, reforço estrutural, confinamento, CFRP, CFRCM, compressão uniaxial.

ABSTRACT

Building rehabilitation is an increasingly common practice in Civil Engineering. Thus, the search for new strengthening methods and techniques, adequate for existing constructions, is essential. With this in mind, an experimental study was carried out on the confinement of concrete columns, with circular section, using a mortar reinforced by an unidirectional carbon fiber textile mesh.

The main objective of this study is to characterize the CFRCM (Carbon Fabric Reinforced Cementitious Matrix) as a confinement system. Fiber composites, namely CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), are in great demand for strengthening purposes, but they present some disadvantages that can be overcome by this innovative technique that combines composites with an inorganic matrix.

The experimental testing campaign consisted of a sequence of uniaxial compression failure tests, using twelve specimens, two of which were reference unstrengthened models. The strengthened specimens, were divided into two series, one strengthened with carbon fiber sheets and another with mortar reinforced with a carbon fiber textile mesh. In both series, the number of layers were varied. The strengthening was applied over the whole height of the columns, with the fibers of the jackets and the textile mesh oriented in the transverse direction of the columns.

The experimental results were analyzed using several parameters that characterize the compressive behavior of confined concrete. Both strengthening solutions made possible to increase the maximum load and the corresponding axial strain. The CFRCM reinforcement presented some advantages, namely its post-peak response, supporting larger deformations until losing all its load bearing capacity, but also its simpler application when compared with the CFRP alternative.

Keywords:

Concrete columns, circular section, strengthening, confinement, CFRP, CFRCM, uniaxial compression.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	i
ÍNDICE DE TABELAS	vii
SIMBOLOGIA	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e motivação.....	1
1.2. Objetivos da dissertação	2
1.3. Organização do documento	3
CAPÍTULO 2. TÉCNICAS DE REFORÇO DE PILARES COM MATERIAIS COMPÓSITOS	5
2.1. Introdução	5
2.2. Sistemas compósitos de FRP	7
2.2.1. Fibras	8
2.2.2. Matriz polimérica.....	10
2.2.3. Resinas.....	11
2.2.4. Técnicas de colagem.....	13
2.3. Tecidos de CFRP	18
2.3.1. Encamisamento com tecidos de CFRP	19
2.4. Reforço de fibras de carbono em matriz cimentícia	20
2.4.1. Encamisamento com FRCM.....	21
CAPÍTULO 3. CONFINAMENTO DE BETÃO COM MATERIAIS COMPÓSITOS	23
3.1. Introdução	23
3.2. Confinamento com armaduras de aço.....	23
3.2.1. Tensão lateral de confinamento	24
3.2.2. Modelo teórico.....	28
3.3. Confinamento com tecidos de CFRP.....	31
3.3.1. Tensão lateral de confinamento	31

3.3.2. Modelo teórico.....	33
3.4. Confinamento com CFRCM.....	36
3.4.1. Tensão lateral de confinamento	36
3.4.2. Modelos teóricos.....	37
CAPÍTULO 4. ESTUDO EXPERIMENTAL DO BETÃO CONFINADO	43
4.1. Introdução	43
4.2. Caracterização dos modelos	43
4.2.1. Geometria das secções transversais	43
4.2.2. Pormenorização das armaduras	44
4.2.3. Configuração das soluções de confinamento.....	45
4.2.4. Procedimento da aplicação do reforço.....	45
4.3. Caracterização dos materiais	49
4.3.1. Aço.....	49
4.3.2. Betão.....	50
4.3.3. Resina epóxida.....	57
4.3.4. CFRP	59
4.3.5. Malha têxtil de fibras de carbono	60
4.3.6. Argamassa estrutural	60
4.4. Ensaio experimentais	64
4.4.1. Equipamento de ensaio e aquisição de dados	64
4.4.2. Instrumentação.....	64
CAPÍTULO 5. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	67
5.1. Introdução	67
5.2. Resultados experimentais	67
5.2.1. Série SNR	67
5.2.2. Série CNR.....	68
5.2.3. Série CA	69
5.2.4. Série SA.....	75
5.2.5. Série CC.....	76
CAPÍTULO 6. ANÁLISE DE RESULTADOS	81
6.1. Introdução	81
6.2. Análise dos parâmetros dos ensaios	81
6.3. Comparação entre os modelos teóricos e os resultados experimentais	89
CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
7.1. Conclusões.....	93

7.2. Trabalhos futuros	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE - CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA	103
ANEXO – FICHAS TÉCNICAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Monsanto House of the Future	5
Figura 2.2 - Reforço de estruturas: a) reforço à flexão de uma laje; b) reforço à flexão de uma viga; c) reforço ao corte de um pilar e d) reforço de uma parede de alvenaria	6
Figura 2.3 - Fases de um compósito reforçado por fibras: a) representação esquemática e b) modelo assimétrico de uma fibra	8
Figura 2.4 - Variação da resistência de acordo com a orientação das fibras	8
Figura 2.5 - Diagrama tensão - extensão dos principais FRPs solicitados à tração	9
Figura 2.6 - Exemplos de matrizes poliméricas, termoplásticas e termoendurecíveis	11
Figura 2.7 - Técnicas de reforço de betão: a) laminados e tecidos por EBR e b) laminados por NSM	14
Figura 2.8 - Exemplo de um laminado de FRP	15
Figura 2.9 - Compósito de FRP curado in situ: a) manta e b) tecido	16
Figura 2.10 - Encamisamento de betão automatizado: a) esquematização do sistema e b) pilar de betão reforçado pela técnica de encamisamento automático	16
Figura 2.11 - Reforço com FRP pré-esforçado: a) aplicação do pré-esforço no laminado; b) colagem do compósito e c) ancoragem e libertação do compósito após o endurecimento do adesivo	17
Figura 2.12 - Exemplos de malhas têxteis: a) malha bidirecional de fibra de carbono [34] e b) malha bidirecional de fibra de vidro	18
Figura 2.13 - Reforço estrutural com FRCM: a) de um arco e b) de uma parede	18
Figura 2.14 - Esquematização de uma manta de CFRP unidirecional	19
Figura 2.15 - Esquematização do reforço de FRCM	21
Figura 2.16 - Encamisamento de pilares de betão com FRCM: a) secção circular e b) secção retangular	22
Figura 3.1 - Exemplos de pormenorização de cintas: a) em pilares circulares e b) em pilares retangulares	23
Figura 3.2 - Efeito dos diferentes tipos de confinamento no diagrama de tensão-extensão do betão	24
Figura 3.3 - Tensão lateral de confinamento com cintas de aço em secções circulares	25
Figura 3.4 - Efeito de parábola no confinamento do betão entre as armaduras transversais	27

Figura 3.5 - Área de betão efetivamente confinado, a meia altura entre cintas	28
Figura 3.6 - Diagrama de tensão-deformação proposto por Mander et al.	30
Figura 3.7 - Diagrama de tensão-deformação comparativo entre o aço e o FRP	31
Figura 3.8 - Tensão lateral de confinamento com encamisamento de CFRP em secções circulares	32
Figura 3.9 - Comparação do betão não confinado com aço e FRP	34
Figura 3.10 - Modelo de confinamento bilinear proposto por Samaan et al.	35
Figura 3.11 - Tensão lateral de confinamento com encamisamento de CFRCM em secções circulares	37
Figura 3.12 - Diagrama de tensão-extensão para o betão confinado com FRCM	40
Figura 4.1 - Dimensões dos modelos	44
Figura 4.2 - Pormenorização das armaduras dos modelos de betão armado	44
Figura 4.3 - Procedimento de aplicação das tecidos de CFRP	47
Figura 4.4 - Procedimento de aplicação da malha têxtil de fibras de carbono	48
Figura 4.5 - Disposição das armaduras nas cofragens: a) vista geral das cofragens e b) armaduras suspensas nas cofragens com varão de 3 mm.....	50
Figura 4.6 - Betoneira utilizada na betonagem.....	52
Figura 4.7 - Betonagem: a) disposição inicial; b) betonagem indireta com recurso a carrinho de mão e c) resultado da betonagem	53
Figura 4.8 - Ensaio de resistência à compressão em cubos de betão	54
Figura 4.9 - Sistema de ensaio em provetes cilíndricos de betão	56
Figura 4.10 - Pilar com S&P Resin 200 HP aplicado na superfície	58
Figura 4.11 - Aplicação da resina de laminação	59
Figura 4.12 - Manta de CFRP na fase de corte	59
Figura 4.13 - Fase de corte do ARMO-mesh® L500.....	60
Figura 4.14 - Ensaio de resistência à tração por flexão em provetes de argamassa: a) prensa utilizada e b) sistema de ensaio	62
Figura 4.15 - Dimensões do sistema de ensaio de resistência à flexão da argamassa	62
Figura 4.16 - Sistema de ensaio de resistência à compressão de argamassa	63
Figura 4.17 - Visão geral do sistema de ensaio	64
Figura 4.18 - Transdutores de deslocamentos verticais utilizados nos ensaios	65
Figura 4.19 - Exemplo da instrumentação dos modelos: a) CNR e b) CA ₁ -01	65
Figura 4.20 - Posicionamento dos extensómetros num modelo da série CC	66
Figura 4.21 - Exemplo de um modelo da série CC devidamente instrumentado	66
Figura 5.1 - Diagrama força-deformação do modelo SNR, da série de referência	68
Figura 5.2 - Modo de rotura, modelo SNR.....	68
Figura 5.3 - Diagrama força-deformação do modelo CNR, da série de referência.....	69

Figura 5.4 - Modo de rotura, modelo CNR: a) visão geral e b) pormenor das armaduras	69
Figura 5.5 - Diagrama força-deformação dos modelos CA ₁	70
Figura 5.6 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA ₁ - 01.....	71
Figura 5.7 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA ₁ - 02.....	71
Figura 5.8 - Diagrama força-deformação dos modelos CA ₂	72
Figura 5.9 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA ₂ - 01.....	72
Figura 5.10 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA ₂ - 02.....	73
Figura 5.11 - Diagrama força-deformação dos modelos CA ₃	74
Figura 5.12 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA ₃ - 01.....	74
Figura 5.13 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA ₃ - 02.....	75
Figura 5.14 - Diagrama força-deformação do modelo SA ₂	76
Figura 5.15 - Pormenores do modo de rotura do modelo SA ₂	76
Figura 5.16 - Diagrama força-deformação do modelo CC ₁	77
Figura 5.17 - Modo de rotura do modelo CC ₁	78
Figura 5.18 - Diagrama força-deformação do modelo CC ₂	78
Figura 5.19 - Modo de rotura do modelo CC ₂	79
Figura 5.20 - Diagrama força-deformação do modelo CC ₃	79
Figura 5.21 - Modo de rotura do modelo CC ₃	80
Figura 6.1 - Forças de compressão máxima (valores médios)	82
Figura 6.2 - Extensões axiais de compressão (valores médios)	83
Figura 6.3 - Forças de compressão máximas e respetivas extensões axiais.....	83
Figura 6.4 - Curvas força-deformação das séries de referência SNR e CNR.....	85
Figura 6.5 - Curvas força-deformação das séries CA ₂ e SA ₂	85
Figura 6.6 - Curvas força-deformação axial das séries CA ₁ e CC ₁	87
Figura 6.7 - Curvas força-deformação axial das séries CA ₂ e CC ₂	87
Figura 6.8 - Curvas força-deformação axial das séries CA ₃ e CC ₃	88
Figura 6.9 - Curvas força-deformação das séries CNR e CA.....	88
Figura 6.10 - Curvas força-deformação das séries CNR e CC.....	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis	12
Tabela 2.2 - Materiais constituintes dos sistemas comerciais de FRP	14
Tabela 3.1 - Modelos analíticos	39
Tabela 4.1 - Modelos das séries da campanha experimental.....	45
Tabela 4.2 - Características dos varões de aço de 6mm e 8mm de diâmetro	49
Tabela 4.3 - Tabela de quantidades de betão.....	50
Tabela 4.4 - Volumes de agregados e ligantes do betão	51
Tabela 4.5 - Valores de cálculo da baridade	52
Tabela 4.6 - Volume, baridade e peso dos agregados da mistura do betão	52
Tabela 4.7 - Propriedades da betoneira utilizada	52
Tabela 4.8 - Tabela de pesos dos materiais constituintes do betão	53
Tabela 4.9 - Tensão de rotura à compressão do betão.....	55
Tabela 4.10 - Valores de cálculo para a taxa de carregamento no ensaio de compressão diametral	56
Tabela 4.11 - Tensão de rotura à tração do betão, através de compressão diametral.....	57
Tabela 4.12 - Propriedades da Resin 220 HP, segundo o fabricante	57
Tabela 4.13 - Propriedades da Resin 55 HP, segundo o fabricante	58
Tabela 4.14 - Propriedades dos tecidos de fibras de carbono, segundo o fabricante	59
Tabela 4.15 - Propriedades da malha de carbono ARMO-mesh® L500, segundo o fabricante ..	60
Tabela 4.16 - Propriedades da argamassa estrutural, ARMO-crete®, segundo o fabricante	61
Tabela 4.17 - Características dos transdutores de deslocamentos verticais	65
Tabela 6.1 - Resultados experimentais: força de compressão máxima, extensão axial e extensão lateral.....	82
Tabela 6.2 - Influência das armaduras de aço no confinamento do betão.....	84
Tabela 6.3 - Influência do tipo de reforço nos valores da força e extensão do betão confinado ..	86
Tabela 6.4 - Valores de da tensão lateral de confinamento dos modelos CA	90
Tabela 6.5 - Tensões e extensões dos modelos CA.....	90
Tabela 6.6 - Comparação entre a tensão de confinamento máxima teórica e experimental.....	91
Tabela 6.7 - Comparação entre a extensão axial teórica e experimental.....	91

SIMBOLOGIA

Notações romanas maiúsculas

Símbolo	Descrição
---------	-----------

A_c	- área da secção de betão confinado
A_{comp}	- área da secção transversal do provete sujeito a uma força de compressão
A_e	- área de secção de betão efetivamente confinado
A_f	- área de malha têxtil por unidade de espessura
A_{gt}	- extensão do aço para o ponto de tensão máxima
A_{sl}	- área total de armaduras longitudinais
A_{sw}	- área de armadura
D_c	- diâmetro do provete cilíndrico de betão
D_f	- diâmetro da secção de betão encamisado com CFRCM
D_j	- diâmetro da secção de betão encamisado com CFRP
E_1	- declive do primeiro ramo no diagrama tensão-deformação do betão confinado
E_2	- declive do segundo ramo no diagrama tensão-deformação do betão confinado
E_c	- módulo de elasticidade tangente do betão
E_f	- módulo de elasticidade do FRCM fendilhado
E_j	- módulo de elasticidade à tração do encamisamento de FRP
E_{sec}	- módulo de elasticidade secante do betão
F_{co}	- carga máxima de compressão do betão não confinado
F_c	- carga máxima registada no ensaio de resistência à compressão do betão
F_{cc}	- carga máxima de compressão do betão confinado
F_{fl}	- carga máxima registada no ensaio de resistência à tração por flexão da argamassa
F_{sp}	- carga máxima à rotura no ensaio de compressão diametral
K_{conf}	- rigidez do confinamento
L	- comprimento do provete no ensaio de compressão diametral

R	- taxa de carregamento no ensaio de compressão diametral
T_g	- temperatura de transição vítrea
V	- volume do recipiente utilizado no cálculo da baridade
V_o	- volume do núcleo de betão confinado
V_{areia}	- volume de areia
V_{brita}	- volume da brita
V_{cimento}	- volume de cimento
V_{conf}	- volume do sistema de confinamento
$V_{\text{total betão}}$	- volume total de betão a produzir

Notações romanas minúsculas

Símbolo	Descrição
b	- largura do provete de argamassa
d	- altura do provete de argamassa
d_s	- diâmetro do núcleo de betão confinado, medido em relação ao eixo das armaduras transversais
f_o	- ordenada na origem do segundo ramo do diagrama de tensão-deformação do betão confinado com CFRP
f_c	- tensão de compressão do betão
f_{cc}	- tensão de compressão máxima do betão confinado
$f_{ci, \text{ cubos}}$	- resistência à compressão de um provete cúbico individual
$f_{cm, \text{ cilindros}}$	- resistência média à compressão de um provete cilíndrico
$f_{cm, \text{ cubos}}$	- resistência média à compressão de um provete cúbico
f_{co}	- tensão de compressão máxima do betão não confinado
f_{comp}	- resistência à compressão do betão
f_{ct}	- resistência à tração pura do betão
$f_{ct, fl}$	- resistência à tração da argamassa no ensaio de flexão
f_{ctm}	- valor médio da tensão de rotura à tração do betão
$f_{ct, sp}$	- resistência à tração do betão no ensaio de compressão diametral
f_{cu}	- tensão de rotura à compressão do betão confinado
f_f	- tensão de rotura à tração do encamisamento de FRCM

f_j	- tensão de rotura à tração do encamisamento de FRP
f_l	- tensão lateral de confinamento
$f_{l, ef}$	- tensão lateral efetiva de confinamento
f_{sum}	- valor médio da tensão de rotura do aço
f_{sy}	- tensão de cedência do aço da armadura transversal
f_{sym}	- valor médio da tensão de cedência do aço
i	- incremento de tensão do ensaio de compressão diametral
k_a	- coeficiente de eficácia que é função da secção transversal do pilar
k_b	- coeficiente de eficácia que é função da secção transversal do pilar
k_1, k_2	- coeficientes determinados experimentalmente
$k_{1,m}, k_{2,m}$	- coeficientes determinados experimentalmente para o encamisamento com CFRM
k_e	- coeficiente de eficácia de confinamento
k_s	- coeficiente de eficácia de tensão
l	- distância entre os eixos dos rolos de suporte ao ensaio de resistência à argamassa
m, n	- constantes empíricas
m_1	- massa do recipiente vazio utilizado no cálculo da baridade
m_2	- massa do recipiente cheio utilizado no cálculo da baridade
n	- parâmetro de forma, curva de Saaman
n_f	- número de camadas do material de confinamento
r	- parâmetro de cálculo da tensão de compressão do betão (f_c)
s	- espaçamento entre armaduras transversais
s'	- espaçamento livre entre armaduras transversais
t_f	- espessura do encamisamento de FRCM
t_j	- espessura do encamisamento de FRP

Notações gregas minúsculas

Símbolo Descrição

α, β	- coeficientes de eficácia do encamisamento
α_M, β_M	- coeficientes de eficácia do encamisamento com FRCM
ϵ_c	- extensão axial de compressão

ε_{cc}	- extensão axial correspondente à tensão máxima de compressão do betão confinado (f_{cc})
ε_{co}	- extensão axial correspondente à tensão máxima de compressão do betão não confinado (f_{co})
ε_{cu}	- extensão axial correspondente à tensão de rotura do betão confinado (f_{cu})
ε_{fe}	- extensão efetiva de tração
ε_{fu}	- extensão de rotura à tração do FRCM
ε_j	- extensão circunferencial do encamisamento de FRP
ε_{ju}	- extensão circunferencial última do encamisamento de FRP
ε_t	- intersecção dos dois ramos do diagrama de tensão-deformação do FRCM
ρ_b	- baridade
ρ_{conf}	- relação volumétrica de confinamento
ρ_j	- relação volumétrica do FRP
ρ_f	- relação volumétrica do FRCM
ρ_{sc}	- percentagem de armadura longitudinal em relação à área total de betão confinado
ρ_{sw}	- relação volumétrica de armaduras transversais
χ	- relação entre a extensão axial de compressão do betão e a extensão axial correspondente à tensão máxima

Siglas

Símbolo	Descrição
ACI	- <i>American Concrete Institute</i>
AFRP	- <i>Aramid Fiber Reinforced Polymer</i>
BRM	- <i>Basalt Reinforced Mortar</i>
CFRCM	- <i>Carbon Fabric Reinforced Cementitious Matrix</i>
CFRP	- <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
DEC	- Departamento de Engenharia Civil
EBR	- <i>External Bonded Reinforcement</i>
EC2	- Eurocódigo 2
EQM	- Erro Quadrático Médio
FRCM	- <i>Fabric Reinforced Cementitious Matrix</i>
FCT	- Faculdade de Ciências e Tecnologia

FRP	- <i>Fiber Reinforced Polymer</i>
GFRCM	- <i>Glass Fabric Reinforced Cementitious Matrix</i>
GFRP	- <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
HM	- <i>High Modulus</i>
HS	- <i>High Strength</i>
HTT	- <i>High Heat Treatment</i>
IHT	- <i>Intermediate Heat Treatment</i>
IM	- <i>Intermediate Modulus</i>
MHOF	- <i>Monsanto House of the Future</i>
NSM	- <i>Near-Surface Mounted Reinforcement</i>
PAN	- <i>Poliacrilonitrila</i>
PBO	- <i>Poly-p-Phenylene-Benzobisoxazole</i>
TRC	- <i>Textile Reinforced Concrete</i>
TRM	- <i>Textile Reinforced Mortar</i>
UHM	- <i>Ultra High Modulus</i>
UHS	- <i>Ultra High Strength</i>
UNL	- <i>Universidade Nova de Lisboa</i>

Capítulo 1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

No ramo da Engenharia Civil, as estruturas são projetadas tendo em conta o seu período de vida útil, isto é, o tempo em que as estruturas devem servir o seu propósito com o mínimo de intervenções possíveis. No caso de estruturas correntes, esse período corresponde a 50 anos. Estas estruturas devem ser monitorizadas ao longo da sua vida útil, como forma de prevenção.

Contudo, as estruturas não são só intervencionadas aquando do término do período de vida útil, havendo em variados casos a necessidade de intervir mais cedo, fruto de adaptação a novas regulamentações, alterações na utilização, incidentes, entre outras causas.

Um assunto que merece especial atenção é a atividade sísmica. Sabe-se que grande parte das estruturas existentes em Portugal, devido à sua idade, foram projetadas e construídas sem consideração adequada das ações sísmicas [1].

Em estruturas porticadas é fundamental controlar a localização das rótulas plásticas, devendo-se dar especial importância à resistência relativa entre os pilares e as vigas de modo a que as rótulas ocorram nas vigas e não nos pilares. Como tal, as regras atuais de dimensionamento sísmico obrigam a que a resistência dos pilares seja superior à das vigas concorrentes ao mesmo nó. Desta forma é antecipada uma rotura por flexão das vigas ao invés dos pilares, potenciando uma maior ductilidade da estrutura. Caso contrário, a estabilidade global do pórtico poderá estar comprometida, havendo o risco de o mesmo colapsar. Todos estes fatores evidenciam a importância de garantir a segurança dos pilares [1].

As técnicas de reforço de estruturas são um tema em constante evolução, numa procura por melhores soluções, tanto a nível económico como ambiental. Para o reforço de pilares de betão armado recorrem-se a variadas técnicas, das quais se destacam o encamisamento com betão, aço ou materiais compósitos FRP - *Fiber Reinforced Polymers*.

O reforço através de FRP apresenta diversas vantagens, das quais se destacam a leveza do material, a facilidade de aplicação, o baixo grau de intrusividade com pouca alteração à geometria da estrutura e também a possibilidade de reforço parcial (em zonas críticas) ou completo.

O presente trabalho teve como base uma análise experimental. Para isso, foram realizados ensaios de rotura à compressão em três séries de pilares de betão. Uma série de referência, sem reforço, uma série reforçada em toda a altura com tecidos de fibras de carbono (CFRP) e, por último, uma série reforçada também em toda a altura, com argamassa reforçada com malha de fibras de carbono (CFRCM). Os pilares ensaiados na campanha tinham igual secção circular e altura, todavia variou-se o número de camadas de reforço dentro de cada sistema. Ambos os materiais utilizados, de configuração unidirecional, foram aplicados com orientação na direção transversal dos pilares.

Todos os ensaios experimentais de compressão uniaxial dos modelos de pilares, da caracterização do betão e da argamassa tiveram lugar no Laboratório de Estruturas Pesadas do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

1.2. Objetivos da dissertação

O presente trabalho foi desenvolvido de forma a aprofundar o conhecimento existente no âmbito do reforço de pilares de betão, através do estudo de um material compósito inovador, a malha de fibras de carbono. A metodologia tomada para o desenvolvimento desta dissertação foi:

- resumir as principais contribuições nesta área, tendo por base uma pesquisa bibliográfica;
- delinear um programa experimental que permita estudar o confinamento de pilares de betão de secção circular, com compósitos de CFRP e CFRCM;
- analisar experimentalmente o comportamento à compressão dos modelos de pilares de betão confinados com compósitos de CFRP e CFRCM.

Para este trabalho foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- caracterizar o CFRCM enquanto sistema de confinamento e avaliar a sua eficácia;
- comparar os diferentes tipos de reforço utilizados na campanha experimental;
- comparar os resultados experimentais do CFRCM com alguns modelos teóricos existentes na literatura.

1.3. Organização do documento

Esta dissertação divide-se em sete capítulos e está estruturada de acordo com os objetivos estabelecidos.

No capítulo dois introduzem-se várias técnicas desenvolvidas nas últimas décadas de reforço de estruturas de betão armado por confinamento com materiais compósitos, descrevendo os materiais e as tecnologias dos sistemas.

No capítulo três enunciam-se alguns dos principais modelos teóricos através dos quais é possível estimar o confinamento conferido a elementos de betão reforçados por armadura transversal e materiais compósitos.

No capítulo quatro descreve-se o programa experimental que serviu de base ao estudo do confinamento de pilares de betão de secção circular, com diferentes tipos de materiais: CFRP e CFRCM. Numa primeira fase, descrevem-se os modelos de pilares, referindo-se a sua conceção, geometria e pormenorização, a configuração dos sistemas de confinamento e os respetivos processos de aplicação. Fez-se também uma caracterização de alguns dos materiais utilizados na campanha, nomeadamente o betão e a argamassa estrutural. Por último descreve-se o sistema de ensaio e a instrumentação dos modelos.

No quinto capítulo apresentam-se os resultados experimentais dos ensaios de rotura à compressão do betão confinado. Foram ensaiadas três séries, uma de referência com dois modelos não reforçados, outra com três modelos confinados com tecidos de fibras de carbono e por último uma série de sete modelos confinada com a malha de fibras de carbono.

O capítulo seis destina-se à análise dos resultados experimentais, tendo em conta os parâmetros característicos do comportamento do betão confinado, e fazendo uma comparação entre as duas soluções testadas. Por fim, confrontam-se os resultados obtidos do reforço de CFRCM, com os que se obteriam através de expressões teóricas previamente apresentadas.

No capítulo sete expõem-se as principais conclusões deste estudo e apresentam-se algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2. Técnicas de reforço de pilares com materiais compósitos

2.1. Introdução

Reabilitar uma estrutura habitualmente tem como principais focos a correção de anomalias decorrentes de defeitos em fase de projeto ou de construção, a modificação da geometria da estrutura, a alteração da função da estrutura ou a mudança das cargas de dimensionamento pela entrada ou atualização dos regulamentos [2]. Os materiais estruturais podem também ser a razão da reabilitação, tendo em conta a degradação temporal dos mesmos, a ocorrência de ações acidentais como sismos, explosões, incêndios, ou o ataque de agentes químicos.

Na década de 50 do século XX, os plásticos já tinham revelado aplicações na indústria naval, aeronáutica e espacial, contudo a sua contribuição ao nível do setor da construção era inexistente. A empresa americana *Monsanto* percebeu que era importante cultivar o interesse por este material como elemento estrutural pois apresentava vantagens face aos materiais convencionais. Por este motivo construíram uma casa (Figura 2.1) recorrendo a fibra de vidro e aço como principais materiais, este projeto ficou conhecido como *MHOF: Monsanto House of the Future* [3].



Figura 2.1 - Monsanto House of the Future [4]

O reforço estrutural com plásticos destacou-se dos demais quanto à durabilidade, ao baixo peso específico, ao aumento da ductilidade global das estruturas, à grande capacidade de resistência à

corrosão e aos agentes ambientais, fator preponderante em alguns países. Estes materiais são amplamente utilizados no reforço de estruturas, nomeadamente para resistência à flexão de lajes (Figura 2.2 - a) e paredes, resistência à flexão e ao corte de vigas (Figura 2.2 - b), e também confinamento, resistência ao corte e reforço sísmico de pilares (Figura 2.2 - c). Através desta solução tornou-se possível reforçar estruturas de alvenaria (Figura 2.2 - d), limitando e controlando a fissuração das mesmas, sobretudo face a ações sísmicas [5].



a)



b)



c)



d)

Figura 2.2 - Reforço de estruturas: a) reforço à flexão de uma laje [6]; b) reforço à flexão de uma viga [7]; c) reforço ao corte de um pilar [6] e d) reforço de uma parede de alvenaria [8]

A reduzida densidade destes materiais facilita o transporte, o manuseamento e a aplicação dos mesmos. Os FRP são sistemas versáteis que facilmente se adaptam a qualquer estrutura, geometria e secção desejadas. Não obstante, estes materiais não comprometem a arquitetura da estrutura e o processo de aplicação é relativamente rápido.

Ainda assim, esta solução apresenta desvantagens, pois requer mão de obra qualificada, exige proteção contra a radiação ultravioleta, assim como ao fogo, e tem um comportamento elástico até à rotura, contrariamente ao aço que evidencia um patamar de cedência [9].

2.2. Sistemas compósitos de FRP

Os materiais compósitos têm carácter heterogéneo e são caracterizados por terem [10]:

- na sua constituição dois ou mais materiais (fases) de natureza diferente;
- pelo menos duas fases de propriedades físicas e mecânicas que diferem uma da outra, atribuindo ao sistema de FRP as propriedades singulares dos seus constituintes.

Os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras satisfazem ambas as características supracitadas. As propriedades finais dos sistemas de FRP são determinadas pela natureza das várias fases do compósito. Na maioria dos casos, as fases constituintes destes sistemas de reforço são as fibras e a matriz polimérica. Os dois materiais têm funções diferentes, contudo funcionam como um só, garantindo um comportamento único aos FRP [10].

Por um lado, as fibras possuem um elevado desempenho mecânico, por outro, a matriz distribui as solicitações mecânicas exteriores pelas fibras, protegendo-as assim de condições hostis [5] *i.e.* intempéries, agentes biológicos. A matriz polimérica é composta fundamentalmente por resina [11].

De forma a obter um material de elevada resistência mecânica, não basta utilizar as fibras mais resistentes. É igualmente importante garantir uma boa adesão entre a matriz e as fibras usadas. A adesão das fibras é conseguida através de um terceiro componente aplicado, por meio de uma fina camada na superfície das fibras, compatibilizando-as com a matriz orgânica [10]. Esta é uma fase intermediária entre a matriz e as fibras, denominada de interface, como esquematizado na Figura 2.3.

Fatores como a temperatura ambiente e natureza do carregamento têm grande influência nas propriedades mecânicas dos compósitos. Um parâmetro fundamental na caracterização dos materiais compósitos é a temperatura de transição vítrea (T_g), para a qual estes materiais transitam de um estado elástico, rijo e vítreo, para um estado semelhante a borracha [9]. Na transição desta temperatura o módulo de elasticidade da matriz polimérica pode sofrer um decréscimo de até cinco ordens de grandeza [5].

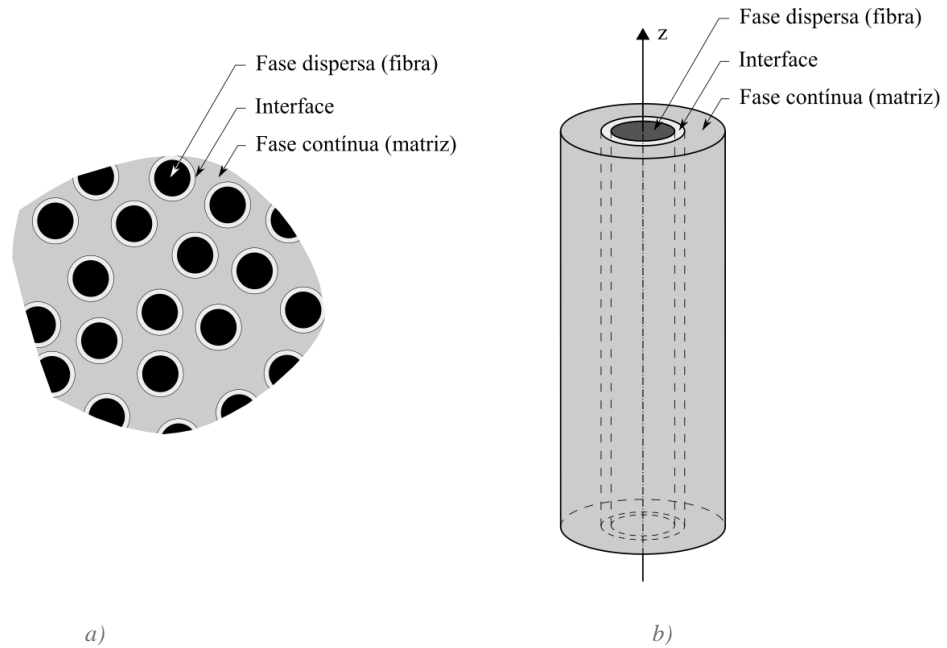


Figura 2.3 - Fases de um compósito reforçado por fibras: a) representação esquemática (adaptado de [10]) e b) modelo assimétrico de uma fibra (adaptado de [12])

2.2.1. Fibras

Os principais fatores que afetam o desempenho dos materiais compósitos são as propriedades mecânicas das fibras, o comprimento, a forma e a orientação das mesmas, as propriedades mecânicas da matriz e a ligação adesiva entre as fibras e a matriz. A orientação da fibra é um critério determinante na escolha das mesmas, uma vez que a resistência à tração e o módulo de elasticidade da fibra são máximos quando esta é solicitada na direção da mesma, sendo menores para as restantes direções [5].

Através da Figura 2.4, verifica-se que a orientação das fibras e o volume das mesmas têm influência na resistência da peça reforçada.

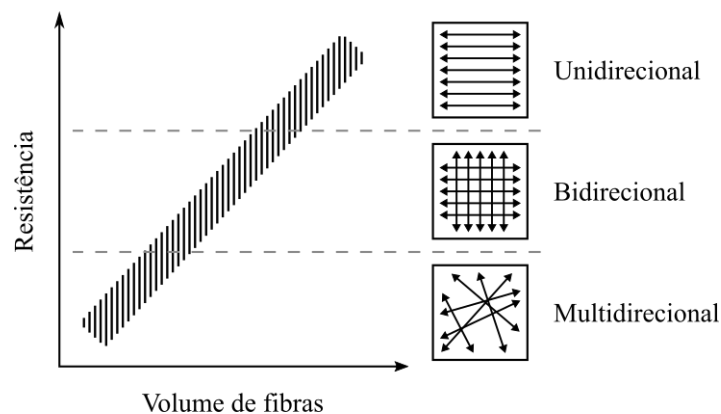


Figura 2.4 - Variação da resistência de acordo com a orientação das fibras (adaptado de [5])

As fibras mais comercializadas no setor da construção civil são as fibras de carbono (CFRP), as fibras de vidro (GFRP) e as fibras de aramida (AFRP). Estes produtos estão disponíveis num leque variado de opções, dependendo das características que se pretende. É possível verificar as diferenças de comportamento mecânico destes tipos de fibras através da Figura 2.5.

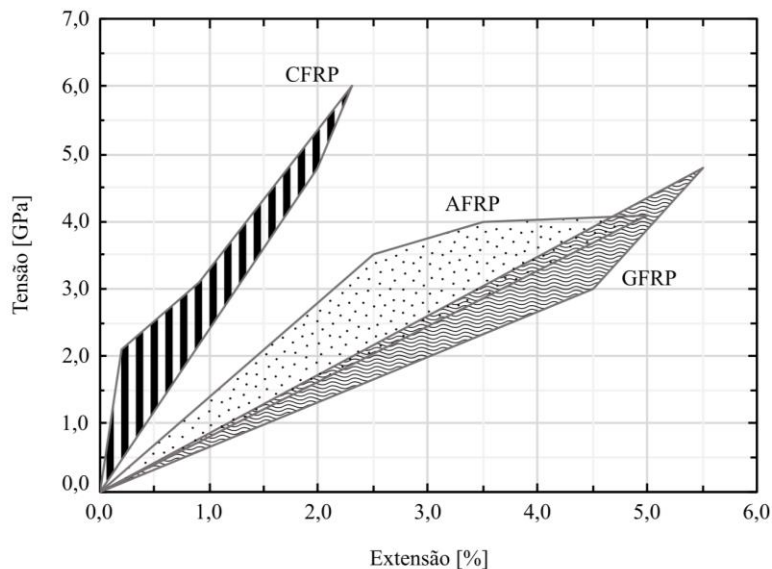


Figura 2.5 - Diagrama tensão - extensão dos principais FRPs solicitados à tração (adaptado de [9])

De todas as fibras supracitadas, as de carbono são as mais utilizadas. Este facto é justificado pelas razões que se apresentam de seguida [13]:

- de todos os materiais fibrosos, as fibras de carbono possuem o maior módulo de elasticidade e uma elevada resistência específica;
- a resistência à fadiga destes compósitos de fibras é bastante boa;
- as fibras de carbono são resistentes à corrosão e quimicamente estáveis.

A base das fibras de carbono são os precursores que podem ser de três tipos: poliacrilonitrila (PAN) que representa a grande maioria das fibras no mercado, rayon e pitch (um subproduto da destilação do petróleo). Precursores diferentes dão origem a fibras de carbono com diferentes propriedades. As fibras de carbono podem ser classificadas segundo as suas propriedades mecânicas, com as seguintes categorias: módulo ultra-elevado (ou UHM, com valores superiores a 500 GPa), módulo elevado (ou HM com valores superiores a 300 GPa), módulo intermédio (ou IM com valores superiores a 200 GPa), módulo baixo (ou de resistência elevada, HS, com valores inferiores a 100 GPa de módulo de elasticidade ou com valores de resistência à tração na ordem dos 3,0 GPa) e por último resistência ultra-elevada (ou UHS, com valores de resistência à tração superiores a 4,5 GPa) [14, 15].

Este material pode também ser classificado segundo as temperaturas finais do tratamento térmico da seguinte forma: tipo I, tratamento térmico alto (HTT), através do qual a temperatura final deve ser superior a 2000 °C (este tratamento pode ser associado a fibras do tipo HM); tipo II, tratamento térmico intermédio (IHT), através do qual a temperatura final deve rondar 1500 °C (este tratamento pode ser associado a fibras do tipo HS); tipo III, tratamento térmico baixo, com temperaturas de tratamento final inferiores a 1000 °C, associadas a fibras do tipo HS [14, 15].

2.2.2. Matriz polimérica

Embora as fibras sejam o principal constituinte dos materiais compósitos, é importante compreender a função que a matriz polimérica desempenha nos sistemas de FRP. A matriz tem como propósito proteger as fibras do ambiente e dos danos exteriores, bem como unificar as fibras prevenindo desta forma falhas prematuras originadas por encurvadura e garantindo uma boa distribuição das cargas [16].

Para além do papel protetor que a matriz desempenha, esta pode também ser usada para atribuir determinadas propriedades físicas ao compósito. De entre as características, que devem ser consideradas na escolha de uma matriz para o sistema de FRP, destacam-se a rigidez, a tensão de rotura, a condutividade térmica e elétrica, a capacidade de impregnar e ligar as fibras, a resistência ao fogo, a sensibilidade a condições ambientais (como humidade e radiação ultravioleta) e a produtos químicos [17].

O que determina as propriedades mecânicas da ligação entre as fibras e os polímeros é a adesão e a compatibilidade entre os dois constituintes, bem como o ângulo entre as fibras e a direção do carregamento [18].

De forma a obter uma boa interação entre as fibras e a matriz, é necessário adaptar os parâmetros de cada um dos constituintes, por exemplo garantindo que a extensão de rotura da matriz é superior à das fibras por forma a prevenir o aparecimento de microfissuras na matriz, antes de ser atingida a capacidade de deformação das fibras e quando solicitada à compressão, a rigidez da matriz deve ser tal que evite a encurvadura prematura das fibras [18].

As matrizes poliméricas são classificadas como termoendurecíveis ou termoplásticas. A diferença entre os dois materiais reside na sua resposta ao aquecimento. As matrizes termoendurecíveis são constituídas por monómeros leves, pouco viscosos, que sofrem uma alteração química irreversível quando são submetidos a um aquecimento, também conhecido como cura, e são convertidos em estruturas tridimensionais. À medida que a cura se desenvolve, o volume disponível para o arranjo molecular diminui, conduzindo a uma menor mobilidade das moléculas e a um aumento da viscosidade. Assim que a resina se torna numa espécie de gel e solidifica como uma borracha é

impossível voltar a refundi-la. Um aquecimento posterior promove ligações poliméricas adicionais até que a resina esteja completamente curada [19].

Em contrapartida, as matrizes termoplásticas não promovem ligações poliméricas através do calor e como tal não necessitam de longos ciclos de cura. Estas são polímeros de alto peso molecular que podem ser fundidas, consolidadas e depois arrefecidas. Visto que as matrizes termoplásticas não têm ligações em cadeia, podem ser reaquecidas posteriormente para operações de formação ou de união. As reações de processamento das resinas termoplásticas são mais rápidas que as termoendurecíveis. Contudo, para tal são necessárias altas pressões e temperaturas devido à alta viscosidade e elevado ponto de fusão deste tipo de polímeros. A alta viscosidade dificulta também a impregnação das fibras exigindo equipamentos complexos e dispendiosos [5, 17, 19].

Na Figura 2.6, esquematizam-se as duas famílias de matrizes abordadas anteriormente, bem como exemplos mais comuns de ambas.

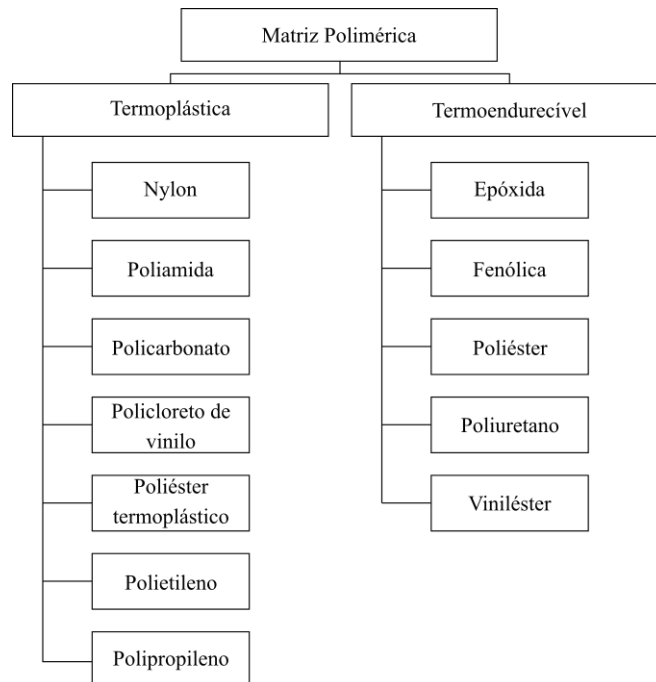


Figura 2.6 - Exemplos de matrizes poliméricas, termoplásticas e termoendurecíveis (adaptado de [20])

2.2.3. Resinas

As matrizes mais utilizadas na produção de FRPs são as resinas termoendurecíveis. É usual encontrá-las disponíveis num estado parcialmente polimerizado com consistência fluida ou pastosa à temperatura ambiente [10].

Quando misturadas com um reagente apropriado, polimerizam formando um material sólido e vítreo. Através do controlo da temperatura é possível acelerar a reação. Das inúmeras vantagens

da resina termoendurecível destacam-se, capacidade de polimerizar à temperatura ambiente, boas propriedades adesivas, resistência a agentes químicos e baixa viscosidade que facilita a impregnação das fibras. Como desvantagens estas resinas apresentam uma variedade de temperaturas de operação restrita, tendo como limite superior a temperatura de transição vítrea; baixa tensão de rotura (comportamento frágil) e sensibilidade à humidade em aplicações *in situ* [10].

As resinas termoendurecíveis mais comuns são a epóxida, a fenólica, a de poliéster, a de poliuretano e a de viniléster, como apresentado na Figura 2.6. Na Tabela 2.1 resumem-se as propriedades físicas e mecânicas de algumas resinas deste tipo.

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis (adaptado de [21])

Resina	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Extensão de rotura (%)
Epóxida	1,20	3,0	90,0	8,0
Fenólica	1,24	2,5	40,0	1,8
Poliéster	1,20	4,0	65,0	2,5
Poliuretano	varia	2,9	71,0	5,9
Viniléster	1,12	3,5	82,0	6,0

No setor da construção, as resinas termoendurecíveis mais utilizadas são as resinas epóxidas, de poliéster e de viniléster. As resinas epóxidas têm melhores propriedades mecânicas (como se pode observar na Tabela 2.1) e excelente durabilidade em relação às demais [9]. Existem ainda materiais compósitos, de matriz polimérica termoplástica, que diferem das resinas termoendurecíveis no processo de instalação.

Estas resinas são, na sua maioria, produtos bi-componentes, compostos por um pré-polímero e um endurecedor. A resina (pré-polímero) é geralmente um fluido viscoso, cujo estado de viscosidade depende do grau de polimerização. O endurecedor deve ser adicionado ao pré-polímero na quantidade exata para que sejam obtidas as propriedades desejadas na resina. A cura desta resina é um processo exotérmico, do qual não resultam produtos secundários [10].

Podem ser necessárias maiores temperaturas ou tempos de cura estendidos, dependendo do tipo e quantidade de endurecedor usado. Podem ser adicionados aceleradores à resina epóxida de maneira a acelerar o tempo de reação ou outros aditivos como materiais de enchimento (*fillers*), para retardar a cura, dependendo das características finais pretendidas [5, 9].

2.2.4. Técnicas de colagem

Neste fase, torna-se crucial diferenciar dois conceitos: o produto e o sistema. Entenda-se produto como o elemento que é destinado para a reparação ou para o reforço, e sistema como a combinação de dois ou mais produtos. Desta forma, tomando como exemplo um material compósito pré-fabricado, os produtos serão o laminado e o adesivo, e o sistema será o compósito resultante da ligação de ambos [22].

Os materiais constituintes destes sistemas, indispensáveis para o reforço de uma estrutura, dividem-se, de um modo geral, em três partes: o compósito, o adesivo de ligação e a resina de preparação da superfície a reforçar (resina primária e argamassa de reparação ou *putty*) [23].

Os sistemas de FRP só poderão ser considerados sistemas de reforço quando aplicados a uma estrutura. Para isso é necessário algo que garanta a aderência entre o compósito e o substrato a reforçar, possibilitando uma adequada transferência das tensões entre os materiais. O componente responsável por isso é o adesivo, e tal como os compósitos também este deve ser escolhido tendo em conta certos fatores, como por exemplo a preparação da superfície a reforçar, a técnica de aplicação, a temperatura de cura e a humidade. É esperado que, através desta simbiose, o par compósito-betão (ou qualquer que seja o substrato a reforçar) funcione como um só, assim que solicitado [24].

O adesivo mais comum é o adesivo epóxico e à semelhança das matrizes poliméricas também este é um bi-composto, sendo os seus constituintes a resina epóxida e o endurecedor.

A espessura da camada desempenha um papel fundamental no comportamento do adesivo, visto que para grandes espessuras a fenda dá-se apenas numa interface, contrariamente ao que acontece com camadas de adesivo finas. Simplificando, camadas de adesivo espessas favorecem um comportamento frágil com pequenos deslocamentos na rotura, ao contrário de camadas adesivas finas que favorecem um comportamento dúctil com grandes deslocamentos na rotura [25].

Há uma melhoria da aderência e consequente capacidade de transferência de carga com a diminuição da rigidez de corte do adesivo. De um modo geral, combinando um compósito com alta rigidez com um adesivo macio, é possível obter-se uma melhoria na resistência da ligação [26].

Devido aos tempos de cura relativamente baixos dos adesivos (epóxidos) os sistemas de FRP são bastante vantajosos por não necessitarem de suporte adicional, uma vez que a aderência ocorre logo após a colagem [24].

O reforço das estruturas, sejam elas de madeira, pedra, aço ou betão, pode ser feito recorrendo à técnica de colagem de materiais compósitos. As duas formas de executar esta técnica, denominam-se na literatura por EBR (*External Bonded Reinforcement*, Figura 2.7 - a), através da qual o reforço é colado no exterior da estrutura a reforçar e por NSM (*Near-Surface Mounted Reinforcement*, Figura 2.7 - b), na qual se cola o reforço por meio de um rasgo previamente feito no recobrimento da superfície a reforçar [23].

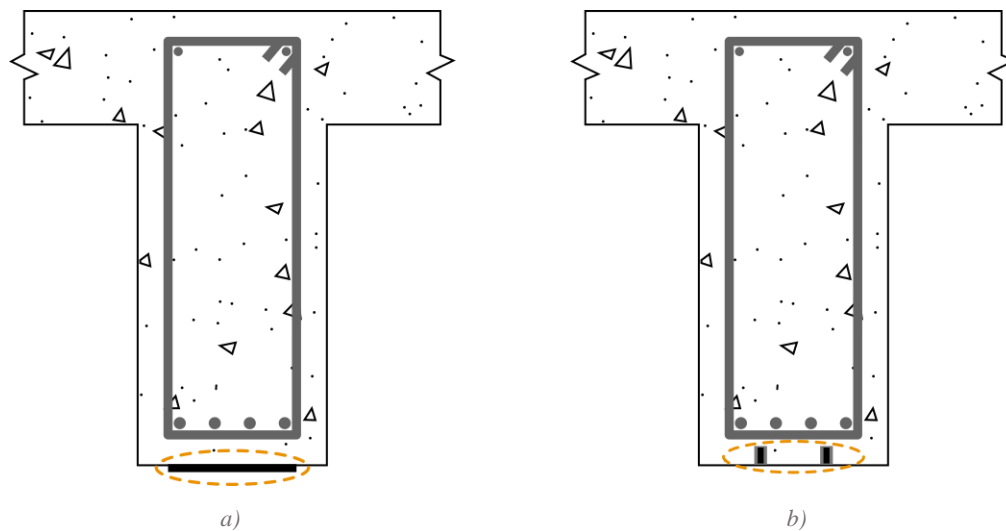


Figura 2.7 - Técnicas de reforço de betão: a) laminados e tecidos por EBR e b) laminados por NSM

Os sistemas de FRP são atualmente comercializados de duas formas, através de sistemas pré-fabricados ou através de sistemas curados *in situ*. Os sistemas variam nos seus constituintes como se apresenta na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Materiais constituintes dos sistemas comerciais de FRP [23]

Sistema comercial	Primário	Argamassa de regularização	Adesivo	Resina de impregnação	Compósito FRP	Fibras contínuas secas ou pré-impregnadas
Pré-fabricado	Opcional	Opcional	Sim	-	Sim	-
Curado <i>in situ</i>	Sim	Opcional	-	Sim	-	Sim

Os sistemas pré-fabricados são obtidos por meio de um processo de impregnação, de um conjunto de feixes de fibras contínuas, com resina. Posteriormente são conferidas a estes sistemas, as formas geométricas finais pretendidas, através de processos de fabrico específicos. As formas mais correntes dos sistemas pré-fabricados são os laminados (*Laminates* ou *Strips*), composto por fibras unidireccionais, dispostas de forma laminar como se exemplifica na Figura 2.8. Estes compósitos são consolidados por um processo de pultrusão, através do qual é controlada a espessura e a largura do laminado. Neste tipo de sistemas o adesivo e a matriz dos FRPs são

materiais distintos [27]. Estes compósitos podem ser utilizados em ambas as técnicas de colagem, EBR e NSM [28].



Figura 2.8 - Exemplo de um laminado de FRP [29]

Os sistemas curados *in situ* podem ser aplicados em estado seco ou pré-impregnados, e caracterizam-se pela elevada flexibilidade que lhes está associada aquando da aplicação. Neste tipo de sistemas, é a própria resina de impregnação das fibras que desempenha o papel de agente adesivo por esta razão, para que não seja confundida com o adesivo dos laminados, é conhecida na literatura por *saturating resin*. Este agente adesivo é o responsável pela transferência dos esforços entre as fibras e a superfície reforçada. As resinas predominantes destes sistemas são também do tipo epóxida, composto por dois componentes, a resina e o endurecedor [30].

Os sistemas curados *in situ* só se constituem num sistema de FRP quando polimerizam, e encontram-se disponíveis sob a forma de mantas ou tecidos, podendo ambos ser fornecidos em estado seco ou pré-impregnado. As mantas (*Sheets*, Figura 2.9 - a) são compostas por fibras unidireccionais, unificadas por uma rede protetora. Os tecidos (*Fabrics*, Figura 2.9 - b) são compostos por fibras bidireccionais ou multidireccionais [23].

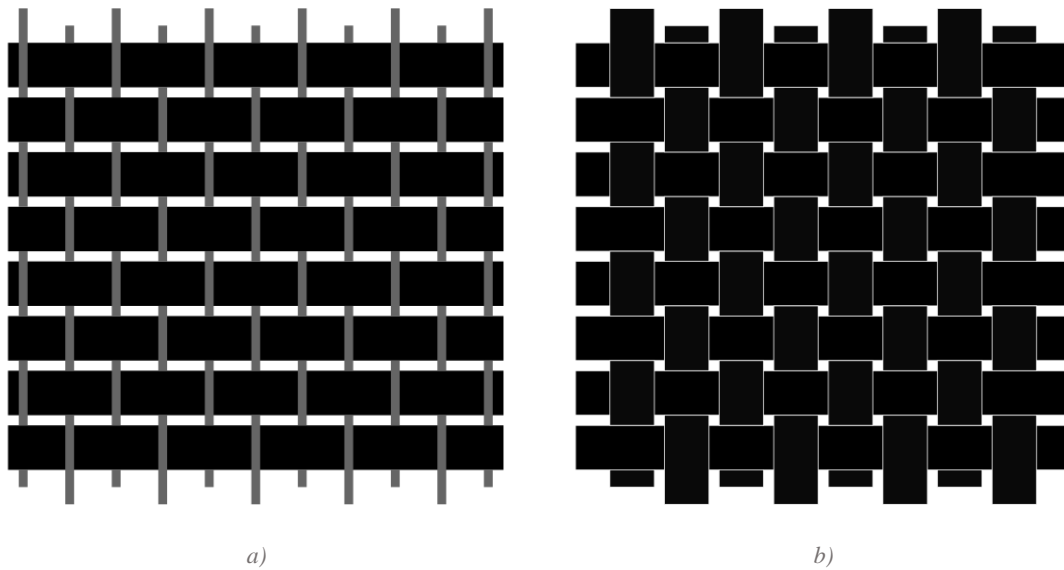


Figura 2.9 - Compósito de FRP curado in situ: a) manta e b) tecido

Para além das técnicas simples já mencionadas (EBR e NSM), há ainda algumas técnicas especiais que têm sido desenvolvidas, das quais se destacam o encamisamento automatizado, a colagem de laminados pré-esforçados e o encamisamento com argamassa reforçada por têxteis.

O encamisamento automatizado (Figura 2.10) é utilizado sobretudo no reforço de pilares e, consiste num mecanismo que percorre o perímetro dos pilares, enrolando as fibras de uma forma contínua ao longo da sua altura. A grande vantagem desta técnica, para além do controlo da qualidade, é a rapidez de instalação dos materiais [31].

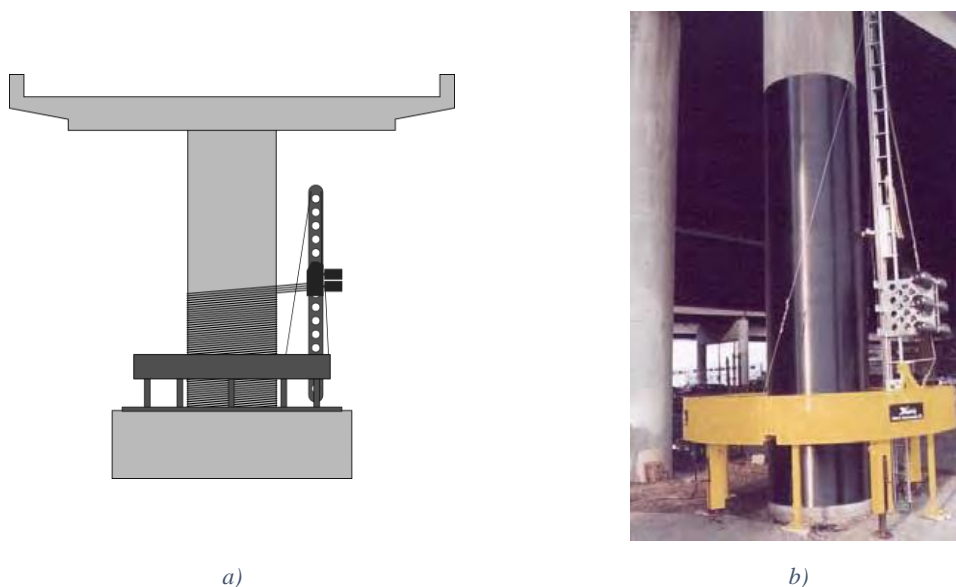


Figura 2.10 - Encamisamento de betão automatizado [31]: a) esquematização do sistema e b) pilar de betão reforçado pela técnica de encamisamento automático

Em certas ocasiões, o reforço de betão com colagem de FRP pré-esforçados (Figura 2.11) poderá ser vantajoso face a outras técnicas. Através desta técnica é possível atrasar o aparecimento e

desenvolvimento de fissuras em estruturas de betão, e mesmo quando estas aparecem desenvolvem-se de maneira mais distribuída. É igualmente possível fechar fissuras pré-existent em estruturas de betão e desta forma melhorar a durabilidade e a capacidade de manutenção das estruturas [31].

Além das vantagens mencionadas anteriormente, destaca-se ainda o aumento da resistência ao corte, uma vez que toda a secção de betão é mobilizada a resistir ao corte, dado o betão permanecer sem fissuras. Consegue-se o mesmo nível de reforço com menores áreas de laminado pré-esforçado do que com laminado normal. Por fim, com o auxílio de uma ancoragem apropriada, é possível aumentar o momento resistente no estado limite último, impedindo roturas associadas ao fenómeno *peeling-off* [31].

Todos estes fatores fazem com que esta técnica seja mais dispendiosa e demore mais tempo a ser finalizada, exigindo adicionalmente a presença de um equipamento que mantenha o laminado na posição desejada até que o adesivo endureça [31].

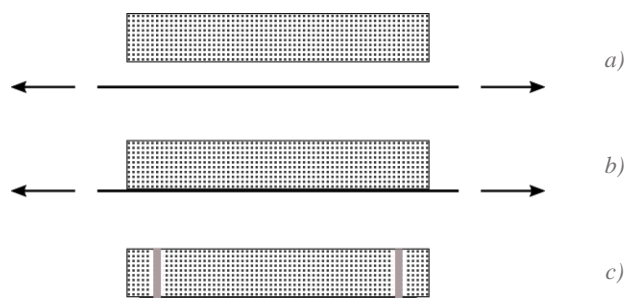


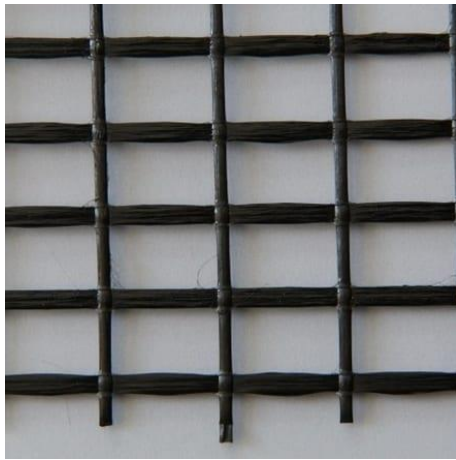
Figura 2.11 - Reforço com FRP pré-esforçado (adaptado de [31]): a) aplicação do pré-esforço no laminado; b) colagem do compósito e c) ancoragem e libertação do compósito após o endurecimento do adesivo

Os sistemas de reforço com FRP têm vindo a ser amplamente utilizados devido às suas propriedades, já mencionadas. Porém, a vulnerabilidade das resinas face a altas temperaturas aliada ao custo destes materiais e à incompatibilidade com os diferentes substratos (betão e alvenaria), justificam a incessante procura por novas soluções igualmente eficientes [32].

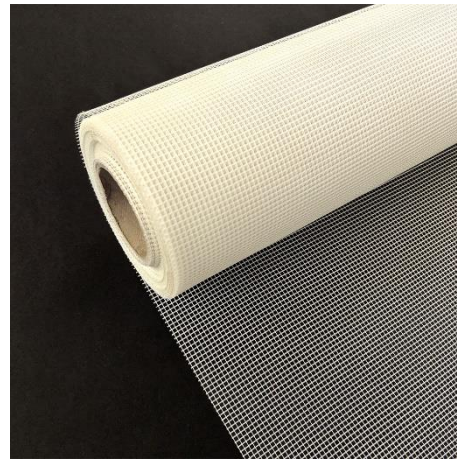
Uma alternativa viável seria a substituição das resinas por ligantes inorgânicos. Porém, tendo em conta a granulometria das argamassas, seria extremamente difícil a penetração e impregnação das fibras. É possível contornar esta limitação se os tecidos de fibras forem substituídos por malhas de fibras. Desta forma, são melhoradas tanto as ligações dos compósitos cimentícios como as interações entre as fibras e a matriz cimentícia [31].

O reforço de têxteis vem sob a forma de estruturas tecidas, não tecidas ou tricotadas, em pelo menos duas direções. Tal como os tevidos de FRP, estes materiais podem ser compostos por

diferentes tipos de fibras das quais se destacam as fibras de carbono (Figura 2.12 - a) e as de vidro (Figura 2.12 - b) [31, 33].



a)



b)

Figura 2.12 - Exemplos de malhas têxteis: a) malha bidirecional de fibra de carbono [34] e b) malha bidirecional de fibra de vidro [35]

Aliando os têxteis com a argamassa, desenvolveu-se uma nova técnica de reforço, *Textile Reinforced Mortar* (TRM, Figura 2.13), que despertou o interesse no reforço de peças de betão e estruturas de alvenaria estrutural e não estrutural. Esta técnica é também denominada na literatura como *Textile Reinforced Concrete* (TRC) ou *Fabric Reinforced Cementitious Matrix* (FRCM), ambas as terminologias representam o reforço de fibras em matriz cimentícia [31].



a)



b)

Figura 2.13 - Reforço estrutural com FRCM: a) de um arco [36] e b) de uma parede [37]

2.3. Tecidos de CFRP

Os tecidos de CFRP pertencem aos sistemas curados *in situ* e podem ser fornecidas em estado seco ou pré-impregnado. Como explicado na secção 2.2.4, para a aplicação deste reforço é necessária uma resina de saturação que seja capaz de transferir os esforços às fibras.

Este tipo de compósitos é formado por feixes de fibras contínuas que são alinhados paralelamente. A posição das fibras é garantida por um tecido multiaxial em forma de rede que pode ser cosido ou tecido, a forma mais comum é um tecido triaxial, como exemplificado na Figura 2.14. Os fios deste tecido podem ser de nylon, poliéster, fibra de carbono e fibra de vidro. Adicionalmente, os tecidos são comercializadas com uma folha de plástico que tem a função de proteger os tecidos e só é retirada aquando da aplicação dos tecidos [38].

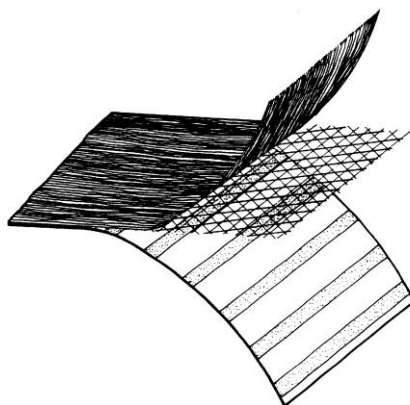


Figura 2.14 - Esquematização de uma manta de CFRP unidirecional [38]

Os tecidos são comercializadas em rolos com larguras entre os 25 e 60 cm e a sua espessura varia entre 0,10 e 0,50 mm. De forma contrária aos laminados, os tecidos podem ser aplicadas em camadas consecutivas. Estas são mais indicadas para reforços que exijam um maior detalhe, já que a sua forma é facilmente ajustada à forma pretendida. Contudo os tecidos são vulneráveis às imperfeições do substrato a reforçar, o que compromete a sua aplicação [39].

2.3.1. Encamisamento com tecidos de CFRP

O encamisamento de pilares com tecidos tem como objetivos aumentar a secção efetiva de betão confinado, a ductilidade e a capacidade resistente da estrutura. As fibras podem ser aplicadas em toda a altura ou em secções específicas do pilar. Para a aplicação deste reforço, o substrato deve estar limpo de poeiras e óleos e deve também ter uma superfície lisa, caso contrário tem de ser preparado para receber os tecidos, através de argamassa de reparação ou injetada com resina epóxida [27].

Os tecidos são utilizadas com muito sucesso em pilares de secção circular e podem também ser aplicadas em secções retangulares. No caso das últimas, os cantos devem ser boleados previamente para que seja possível dobrar a manta, maximizando a eficácia do confinamento [40]. Os cantos devem ser arredondados com um raio mínimo que varia em função do tipo de fibra e deve ser fornecido pelo fabricante [27].

O processo de encamisamento com tecidos de CFRP compreende uma série de passos que se listam de seguida [9]:

1. reparação da superfície (fendas ou zonas desmoronadas) com argamassa de reparação ou *putty*;
2. limpeza (poeiras ou óleos) e regularização da superfície;
3. aplicação do primário;
4. colocação dos tecidos de fibras de carbono;
5. aplicação da segunda camada de resina;
6. se for pretendido um reforço com mais de uma camada, estas devem ser aplicadas seguindo o mesmo procedimento.

2.4. Reforço de fibras de carbono em matriz cimentícia

A técnica de reforço por FRCM combina fibras de alta resistência sob a forma de têxteis (com aberturas em forma de malha) com matrizes inorgânicas. Trata-se de uma técnica economicamente acessível, compatível com diferentes substratos (betão e alvenaria) e com a possibilidade de ser aplicada em superfície húmida. Por estas razões, o uso desta técnica tem despertado mais interesse no reforço de estruturas nas últimas duas décadas [32].

A abertura característica das malhas de têxteis permite uma certa ancoragem mecânica entre a matriz e o reforço. Através de um revestimento dos têxteis é possível melhorar tanto a ancoragem, já mencionada, como a estabilidade do material têxtil. Contudo, os têxteis revestidos são mais rígidos e, tal como o aço, dificilmente se adaptam a geometrias complexas (*e.g.* reforço de vigas em forma de U) [32].

A composição da argamassa utilizada como matriz afeta significativamente o seu comportamento como material compósito, uma vez que a impregnação das fibras na mesma é um aspeto fundamental para obter uma boa ligação entre as fibras e a matriz. A argamassa deve ter granulometria fina, consistência plástica, boa trabalhabilidade, baixa viscosidade (por forma a facilitar a aplicação em superfícies verticais ou íngremes) e resistência ao corte. Por todas estas razões, as argamassas cimentícias são as matrizes mais utilizadas na técnica FRCM (Figura 2.15). É possível melhorar as propriedades mecânicas da argamassa, nomeadamente resistência à flexão e ligação entre a matriz e as fibras, com a adição de polímeros [32].

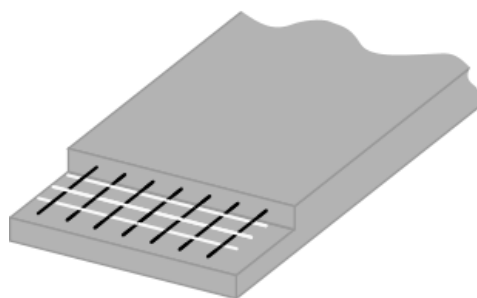


Figura 2.15 - Esquemática do reforço de FRCM

2.4.1. Encamisamento com FRCM

Os materiais compósitos de FRP utilizados na forma de tecidos ou tecidos de reforço são caracterizados por elevadas resistência à tração e rigidez ao longo da fibra, ao contrário das matrizes inorgânicas que apresentam um fraco comportamento à tração. Quando um provete de FRCM é submetido a cargas de tração, o têxtil absorve a maioria das tensões de tração, e a matriz protege as fibras e distribui as tensões pelas mesmas. No entanto, como o processo de quebra da matriz ocorre rapidamente dentro do provete, o comportamento à tração do FRCM é fortemente influenciado pela interação mecânica entre a matriz inorgânica e o próprio tecido. [33].

O processo de reforço por encamisamento com FRCM geralmente envolve os seguintes passos [32, 36, 41]:

1. limpeza (poeiras ou óleos) e preparação da superfície;
2. aplicação uniforme da primeira camada de argamassa na superfície (manualmente ou com recurso a equipamento de projeção);
3. aplicação da malha têxtil na argamassa;
4. aplicação de uma segunda camada de argamassa sobre a malha têxtil;
5. se for pretendido um reforço com mais de uma camada, estas devem ser aplicadas seguindo o mesmo procedimento;

À semelhança dos tecidos de CFRP, no reforço de secções retangulares, os cantos deverão ser boleados com um raio mínimo de 20 mm (Figura 2.16 - b) [41].



a)



b)

Figura 2.16 - Encamisamento de pilares de betão com FRCM: a) secção circular [42] e b) secção retangular [43]

Capítulo 3. Confinamento de betão com materiais compósitos

3.1. Introdução

Com base numa pesquisa bibliográfica realizada, neste capítulo apresenta-se um resumo do estado do conhecimento respeitante ao betão confinado com diferentes materiais compósitos. Inicialmente é feita uma breve apresentação sobre o confinamento de betão com armaduras transversais de aço. Posteriormente, apresentam-se alguns modelos teóricos que caracterizam o desempenho do betão confinado com materiais compósitos.

3.2. Confinamento com armaduras de aço

A armadura transversal tem grande importância no comportamento de estruturas sujeitas a ações sísmicas. A ductilidade das peças de betão merece especial atenção, quando estas são sujeitas a carregamentos cíclicos, devido à eventualidade de ocorrência de rótulas plásticas. É também necessária, uma ductilidade adequada, para que haja uma redistribuição de momentos, [44].

A armadura transversal tem como função o confinamento do betão, bem como impedir a encurvadura da armadura longitudinal. Em pilares circulares, a armadura transversal encontra-se disposta na forma de cintas circulares ou helicoidais. No caso de pilares com secção retangular, aplicam-se cintas retangulares, com cintas interiores ou com varões em forma de gancho. Na Figura 3.1 exemplificam-se formas de cintas em pilares com diferentes secções.

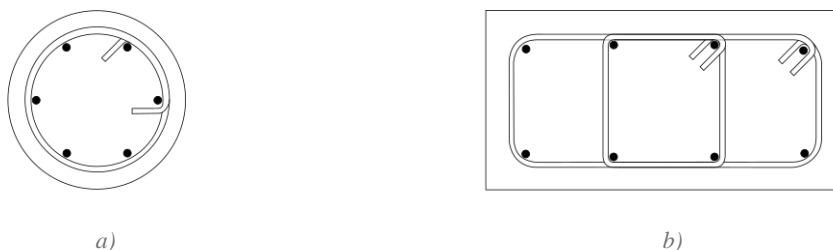


Figura 3.1 - Exemplos de pormenorização de cintas: a) em pilares circulares e b) em pilares retangulares

O betão, como material isotrópico que é, quando carregado axialmente, tem tendência a deformar-se lateralmente por efeito de *Poisson*. Na presença da armadura transversal, a deformação lateral é, de certa forma, impedida, introduzindo assim uma pressão de confinamento.

Fatores como a amarração da armadura transversal, a rigidez das cintas e distribuição das mesmas no pilar, estão diretamente ligados com a eficácia e desempenho do confinamento.

3.2.1. Tensão lateral de confinamento

A tensão lateral de confinamento é um parâmetro que varia com a secção da peça, as propriedades do material de confinamento e da sua pormenorização. Neste caso, a tensão lateral de confinamento exercida pela armadura transversal depende da classe de resistência do aço e da pormenorização da armadura longitudinal e transversal.

Na Figura 3.2 apresenta-se, de forma qualitativa, a influência que diferentes tipos de confinamento têm no gráfico tensão axial - extensão axial do betão, através do qual se verifica que o confinamento assegurado por cintas circulares apresenta uma eficácia superior às restantes soluções.

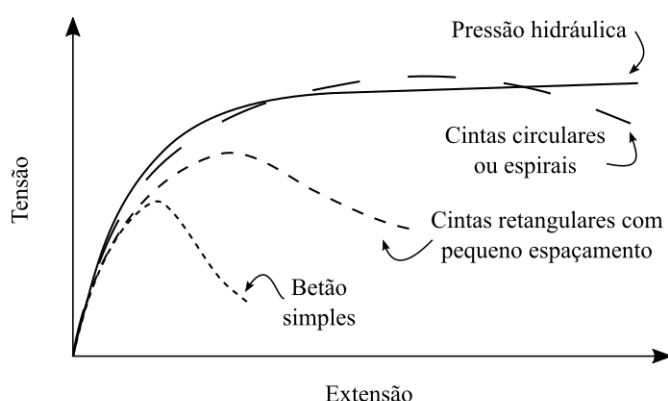


Figura 3.2 - Efeito dos diferentes tipos de confinamento no diagrama de tensão-extensão do betão (adaptado de [39])

Fazendo uma análise à curva tensão-extensão do betão tendo em conta os diferentes tipos de confinamento, é possível aferir que:

- numa primeira fase, a resposta do betão é de certa forma semelhante, independentemente da solução utilizada para o confinamento da peça;
- verifica-se um aumento da ductilidade na presença de confinamento, justificado por um aumento da extensão de rotura em relação ao betão não cintado; verifica-se adicionalmente que, na presença de armadura transversal, a fase pós pico não tem um declive tão acentuado;

- com qualquer uma das soluções de cintagem, obtêm-se consideráveis acréscimos de resistência, em relação ao betão simples.

3.2.1.1. Secções circulares

Tendo como base o estudo de Mander *et al.* (1988) [44], para um elemento de betão armado de secção circular, confinado com recurso a um sistema contínuo (cintagem helicoidal) e submetido a carregamento de compressão axial, forma-se um campo de tensões laterais, como se apresenta na Figura 3.3.

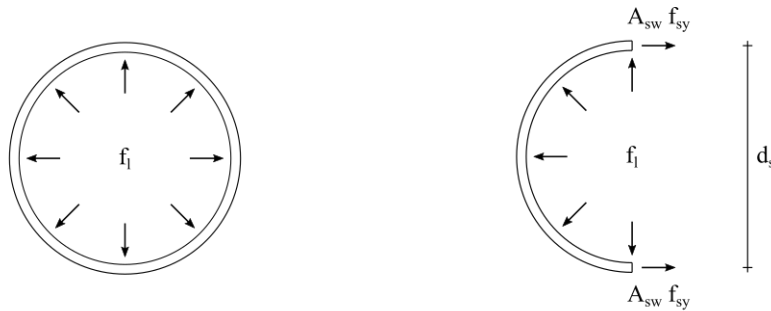


Figura 3.3 - Tensão lateral de confinamento com cintas de aço em secções circulares (adaptado de [45])

A tensão lateral pode ser calculada por equilíbrio de metade do corpo confinado pela cinta de aço. Considerando que a tensão na cinta exercida pela armadura transversal em cedência corresponde a uma tensão lateral uniforme no núcleo do betão, obtém-se o equilíbrio de forças que se apresenta na expressão (3.1) [44].

$$2 f_l A_{sw} = f_l s d_s \quad (3.1)$$

Onde:

- f_l – é a tensão lateral de confinamento no betão;
- A_{sw} – é a área da secção transversal do sistema de confinamento;
- f_{sy} – é a tensão de cedência da armadura transversal;
- s – é o espaçamento entre armaduras transversais;
- d_s – é o diâmetro do núcleo de betão confinado, medido em relação ao eixo das armaduras transversais.

Se a expressão (3.1) for reescrita em ordem à tensão lateral de confinamento, obtém-se:

$$f_l = \frac{2 A_{sw} f_{sy}}{s d_s} \quad (3.2)$$

O sistema de confinamento é quantificado pela relação volumétrica de confinamento, através da expressão (3.3).

$$\rho_{\text{conf}} = \frac{V_{\text{conf}}}{V_o} \quad (3.3)$$

Onde:

- ρ_{conf} – é a relação volumétrica de confinamento;
- V_{conf} – é o volume do sistema de confinamento;
- V_o – é o volume do núcleo de betão confinado.

Assim, para secções circulares, o volume do sistema de confinamento e o volume do núcleo de betão confinado podem ser obtidos através das expressões (3.4) e (3.5), respetivamente.

$$V_{\text{conf}} = A_{\text{sw}} \pi d_s \quad (3.4)$$

$$V_o = \frac{\pi}{4} d_s^2 s \quad (3.5)$$

Substituindo estes volumes na expressão (3.3), obtém-se a relação volumétrica de armaduras transversais (ρ_{sw}) para secções circulares (expressão (3.6)).

$$\rho_{\text{sw}} = \frac{4 A_{\text{sw}}}{s d_s} \quad (3.6)$$

Resolvendo a expressão (3.6) em ordem a A_{sw} e substituindo na expressão (3.1), é possível obter:

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_{\text{sw}} f_{\text{sy}} \quad (3.7)$$

Caso o sistema de confinamento não seja contínuo (cintagem helicoidal), verifica-se que, a tensão lateral de confinamento não é constante ao longo da altura do elemento confinado. Tome-se como exemplo um dado elemento de betão com cintas circulares espaçadas entre si, somente uma parte do betão se pode considerar cintado, fruto do afastamento entre as cintas. Na Figura 3.4 representa-se este fenómeno, onde s' é a distância entre as extremidades das armaduras longitudinais.

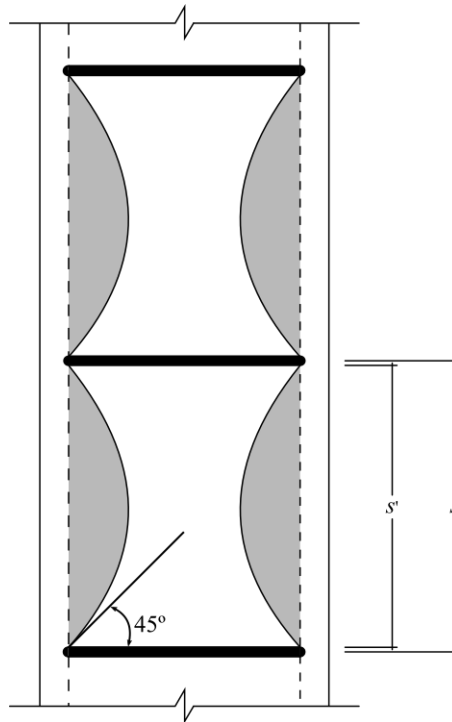


Figura 3.4 - Efeito de parábola no confinamento do betão entre as armaduras transversais (adaptado de [44])

Uma vez que, para cintas espaçadas, a tensão lateral de confinamento não é constante ao longo da altura, tal facto deve ser tido em conta no cálculo [44]. Para tal, multiplica-se a tensão lateral de confinamento por um fator de redução, designado por coeficiente de eficácia de confinamento (k_e). A tensão lateral de confinamento passa a chamar-se tensão lateral de confinamento efetiva ($f_{l,ef}$) e pode ser calculada pela expressão (3.8).

$$f_{l,ef} = \frac{1}{2} \rho_{sw} f_{sy} k_e \quad (3.8)$$

O coeficiente de eficácia de confinamento resulta do quociente entre a área da secção de betão efetivamente confinado e a área da secção de betão confinado (expressão (3.9)).

$$k_e = \frac{A_e}{A_c - A_{sl}} \quad (3.9)$$

Onde:

- A_e — é a área da secção de betão efetivamente confinado;
- A_c — é a área da secção de betão confinado;
- A_{sl} — é a área total de armaduras longitudinais.

A área da secção de betão confinado, A_c , é delimitada pelas cintas da armadura transversal. Para que se entenda a diferença entre os dois conceitos, na Figura 3.5 é exemplificada a área de betão efetivamente confinado.

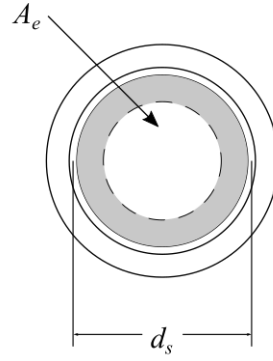


Figura 3.5 - Área de betão efetivamente confinado, a meia altura entre cintas (adaptado de [44])

Assume-se que, na direção longitudinal ocorre um mecanismo de arco formado por uma parábola de segundo grau entre as armaduras transversais, com tangente inicial igual a 45°, como é exemplificado na Figura 3.4 [44]. Tendo isto em conta, é possível substituir as áreas da expressão (3.9) e o coeficiente k_e toma a forma:

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{sc}} \quad (3.10)$$

onde:

- s' – é o espaçamento entre extremidades das armaduras transversais;
- ρ_{sc} – é a percentagem de armadura longitudinal em relação à área total de betão confinado (calculada através da expressão (3.11)).

$$\rho_{sc} = \frac{A_{sl}}{A_c} \quad (3.11)$$

3.2.2. Modelo teórico

Estudos preliminares do comportamento do betão confinado, provaram que, quando o betão é sujeito a pressão hidroestática a resistência e extensão longitudinais, podem ser representadas pelas expressões (3.12) e (3.13), respetivamente [44].

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1 + k_2 \frac{f_l}{f_{co}}\right) \quad (3.13)$$

Onde:

- f_{cc} – é a tensão de compressão axial máxima no betão confinado;

- ε_{cc} – é a extensão axial correspondente à tensão de compressão máxima no betão confinado;
- f_{co} – é a tensão de compressão axial máxima no betão não confinado;
- ε_{co} – é a extensão axial correspondente à tensão de compressão máxima no betão não confinado;
- k_1 e k_2 – são coeficientes que são função da mistura de betão e da pressão lateral.

Os coeficientes k_1 e k_2 são determinados experimentalmente, e nos estudos iniciais estes coeficientes tomaram os valores $k_1 = 4,1$ e $k_2 = 5k_1$. Mais tarde, os mesmos autores deste estudo descobriram que a resistência obtida no betão confinado lateralmente com pressão hidrostática era aproximadamente a mesma que a resistência obtida no betão confinado com armaduras de aço em espiral com um espaçamento reduzido [44].

Diferentes autores levaram a cabo inúmeros testes que demonstraram que o confinamento de pilares pode ser melhorado se [44]:

1. o reforço transversal for menos espaçado;
2. forem incluídos varões em forma de gancho ou cintas suplementares na secção transversal;
3. a distribuição da armadura longitudinal for adequada ao longo do perímetro da secção;
4. for aumentada a tensão de cedência do aço ou for aumentado o volume de armaduras transversais face ao volume de betão confinado;
5. as armaduras retangulares com varões suplementares forem substituídas por armaduras circulares.

Identificadas as variáveis que condicionam o confinamento do betão em pilares, foi desenvolvido um modelo através do qual é possível obter a curva tensão-deformação do betão confinado, podendo ser utilizado para pilares com secções circulares ou quadradas, com qualquer tipo de pormenorização das armaduras transversais (cintas circulares, quadradas ou retangulares), com aplicação de cargas de compressão axial, estáticas ou dinâmicas, e aplicadas de forma monotónica ou cíclica [46]. Na literatura estão disponíveis vários modelos para o confinamento de betão com armaduras de aço. Nesta secção apresenta-se o modelo teórico proposto por Mander *et al.* (1998) [44].

i) Modelo de Mander *et al.* (1988) [44]

A curva tensão-deformação do betão confinado por armaduras proposta por Mander *et al.* (1988) [44] é representada na Figura 3.6. Esta curva tem por base a expressão (3.14), de Popovics (1973) [47], através da qual é calculada a tensão de compressão no betão (f_c).

$$f_c = \frac{f_{cc} \chi r}{r - 1 + \chi^r} \quad (3.14)$$

Onde:

- χ – representa o quociente entre a extensão axial de compressão no betão e a extensão axial correspondente à tensão de compressão máxima no betão confinado (expressão (3.15));
- r – é um parâmetro de cálculo (expressão (3.17)).

$$\chi = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (3.16)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (3.17)$$

Onde:

- ε_c – é a extensão axial de compressão no betão;
- E_c – é o módulo de elasticidade tangente no betão (expressão (3.18));
- E_{sec} – é o módulo de elasticidade secante no betão (expressão (3.19)).

$$E_c = 5000 \sqrt{f_{co}} \quad (3.18)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (3.19)$$

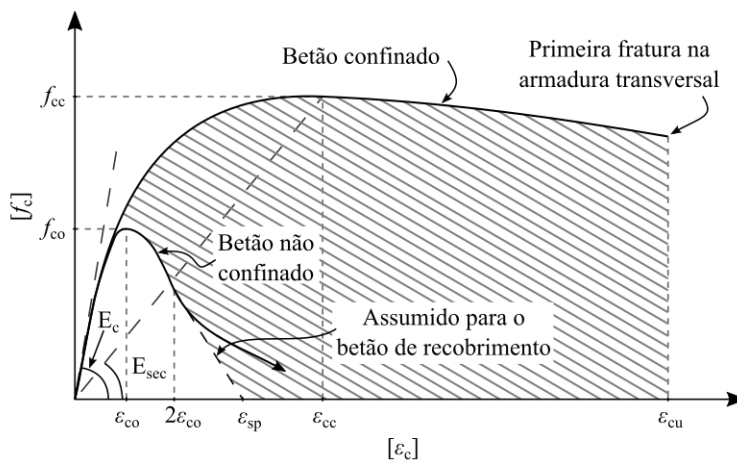


Figura 3.6 - Diagrama de tensão-deformação proposto por Mander et al. (adaptado de [44])

Neste modelo, a determinação da tensão de compressão máxima do betão confinado é feita através de um ábaco, que é função da tensão lateral de confinamento. Para o caso em que as tensões

laterais efetivas de confinamento ($f_{l,ef}$) são iguais, é possível calcular a tensão de compressão do betão confinado recorrendo à expressão (3.20). A tensão lateral efetiva de confinamento é calculada através da expressão (3.8) [44].

$$f_{cc} = f_{co} \left(-1,254 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94 f_{l,ef}}{f_{co}}} - 2 \frac{f_{l,ef}}{f_{co}} \right) \quad (3.20)$$

3.3. Confinamento com tecidos de CFRP

O reforço de pilares através de um sistema de CFRP pode ser feito de forma contínua no desenvolvimento do elemento de betão ou de forma parcial com faixas espaçadas de largura predefinida. É habitual estes sistemas serem aplicados com as fibras orientadas segundo a transversal do elemento, contudo os sistemas de CFRP podem ser aplicados segundo outras orientações.

Os sistemas de FRP apresentam um comportamento elástico até à rotura, exercendo uma tensão lateral de confinamento continuamente crescente à medida que o esforço axial aumenta. No caso da tensão de confinamento exercida pelas armaduras de aço, esta tem um comportamento semelhante até a armadura entrar em cedência, aplicando a partir desse ponto uma pressão constante ao betão, como se evidencia na Figura 3.7.

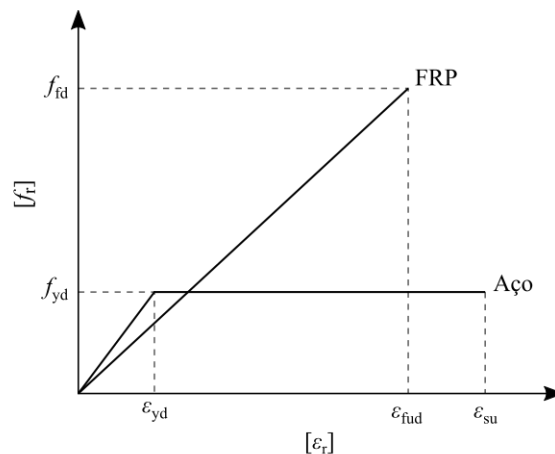


Figura 3.7 - Diagrama de tensão-deformação comparativo entre o aço e o FRP (adaptado de [9])

3.3.1. Tensão lateral de confinamento

Tal como na tensão lateral exercida pelas cintas de aço, também a força exercida pelos sistemas de CFRP é função da geometria da secção, das propriedades do reforço bem como da sua pormenorização. Assim, a tensão lateral de confinamento, exercida pelos sistemas de CFRP

depende do tipo de fibra e da pormenorização dos mesmos (orientação das fibras, número de camadas e zonas a reforçar).

3.3.1.1. Secções circulares

A eficiência do confinamento está diretamente relacionada com a geometria da secção, sendo o caso da secção circular a solução mais eficiente dos reforços. Assim considera-se que, para um dado elemento de betão de secção circular, confinado a toda a altura, o núcleo de betão se encontra totalmente confinado. À semelhança do confinamento com armaduras de aço, é possível simplificar o cálculo da tensão lateral de confinamento com o encamisamento de CFRP através do equilíbrio de forças horizontais. Na Figura 3.8 exemplificam-se as forças presentes no núcleo de betão confinado com o sistema de CFRP.

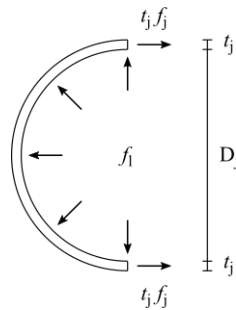


Figura 3.8 - Tensão lateral de confinamento com encamisamento de CFRP em secções circulares (adaptado de [9])

Considerando que a pressão exercida pelo sistema de CFRP sobre o núcleo do betão é uniforme ao longo do perímetro, é possível calcular a tensão lateral de confinamento (f_l) através da expressão (3.21), para a rotura da secção.

$$f_l = \frac{2 t_j f_j}{D_j} \quad (3.21)$$

Onde:

- t_j — é a espessura do encamisamento de CFRP;
- f_j — é a tensão de rotura à tração do encamisamento de CFRP;
- D_j — é o diâmetro da secção de betão encamisada com CFRP.

Uma vez que o CFRP exibe um comportamento elástico-linear até à rotura, a tensão lateral pode escrever-se através da expressão (3.22).

$$f_l = \frac{2 t_j E_j \varepsilon_j}{D_j} \quad (3.22)$$

Onde:

- E_j – é o módulo de elasticidade à tração do encamisamento de CFRP;
- ε_j – é a extensão circunferencial do encamisamento de CFRP.

Para o caso do confinamento com sistemas de CFRP aplicado de forma contínua em toda a altura, a relação volumétrica de compósito (ρ_j) é dada pela expressão (3.23).

$$\rho_j = \frac{4 t_j}{D_j} \quad (3.23)$$

Resolvendo a expressão (3.23) em ordem à espessura do compósito (t_j), é possível chegar à expressão (3.24) reescrevendo a expressão (3.22). A tensão máxima de confinamento (expressão (3.25)) é obtida com base na expressão (3.24) com a diferença de ser calculada em função da extensão circunferencial última do encamisamento de CFRP (ε_{ju}).

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_j \quad (3.24)$$

$$f_{lu} = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju} \quad (3.25)$$

A rigidez do confinamento de CFRP (K_{conf}) é determinada através da expressão (3.26). Tendo em conta este conceito, a expressão (3.24) pode ser rescrita em função da extensão circunferencial do betão (ε_j) (expressão (3.27)).

$$K_{conf} = \frac{1}{2} \rho_j E_j \quad (3.26)$$

$$f_1 = K_{conf} \varepsilon_j \quad (3.27)$$

3.3.2. Modelo teórico

No final do século XX foram muitos os estudos experimentais conduzidos por diversos autores, com o objetivo de estudar o comportamento de pilares de betão confinado com diferentes tipos de soluções com sistemas compósitos de FRP. Apesar da larga campanha experimental, não havia ainda sido estabelecido um modelo analítico apropriado. Inicialmente, tentou-se aplicar ao FRP o modelo anteriormente utilizado para o aço. Contudo, rapidamente se concluiu que esta utilização conduzia a extensões imprecisas e resultados pouco conservativos. Desde então, foram propostos vários modelos específicos para pilares de betão confinados com FRP. Contudo, estes modelos foram calibrados pelos próprios autores com base em ensaios experimentais realizados pelos

mesmos. Por outro lado, está disponível na literatura uma vasta gama de valores para as variáveis dos modelos, que podem ser utilizados como referência para a avaliação dos modelos [48].

Na Figura 3.9 apresenta-se um gráfico de tensão-deformação axial cujos valores de tensão e extensão são normalizados em relação à tensão de compressão máxima e à respetiva extensão do betão não confinado. Através da mesma figura compara-se a curva tensão-deformação axial do betão não confinado com as mesmas curvas, para o betão confinado com aço e com CFRP. É notável que o ramo inicial de todas as curvas é sensivelmente o mesmo da fase elástica do betão não confinado, até à rotura do mesmo. O betão confinado com aço tem um comportamento mais ou menos linear até atingir a tensão máxima, seguindo-se uma descida gradual, sendo assim evidente que a tensão de rotura pós pico é inferior à tensão de compressão máxima. O betão confinado com CFRP apresenta uma curva bilinear distinta, que tem uma zona de transição na tensão máxima do betão não confinado, e posteriormente tem um ramo crescente estável até atingir a tensão última. Como tal, a tensão de rotura e a tensão última são as mesmas e correspondem ambas à tensão de rotura do sistema de confinamento [48].

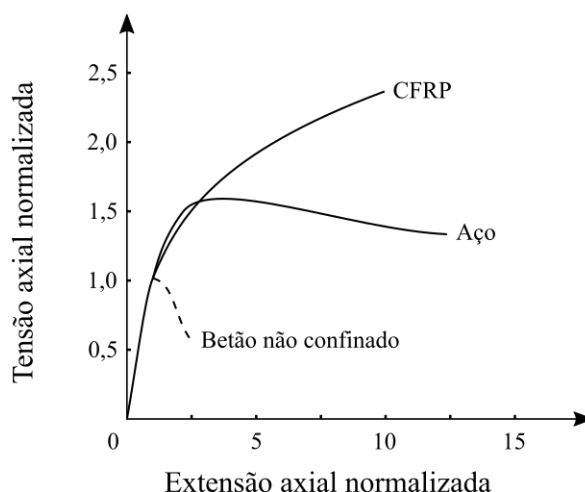


Figura 3.9 - Comparação do betão não confinado com aço e FRP (adaptado de [49])

O encamisamento de betão com CFRP é um confinamento do tipo passivo, decorrente da expansão lateral que ocorre quando o betão é sujeito a um carregamento uniaxial. O confinamento só começa a ser mobilizado quando o betão começa a atingir a tensão máxima do betão não confinado, e é por esse motivo que o primeiro ramo do diagrama apenas depende das propriedades do betão. Ao contrário, o segundo ramo do diagrama é fortemente dependente das propriedades do compósito [48].

Através das inúmeras investigações levadas a cabo por diferentes autores, muitos foram os modelos propostos para o betão confinado com FRP. Nesta secção, apresenta-se um modelo

teórico para o confinamento de betão com CFRP, uma vez que o principal objetivo deste trabalho é a caracterização do reforço com CFRCM.

i) Samaan *et al.* (1998) [50]

Trata-se de um modelo bilinear, que tem por base a relação de quatro parâmetros proposta por Richard e Abbot (1975) [51], que é descrita através da expressão (3.28). A curva tensão-extensão axial deste modelo é apresentada na Figura 3.10 [50].

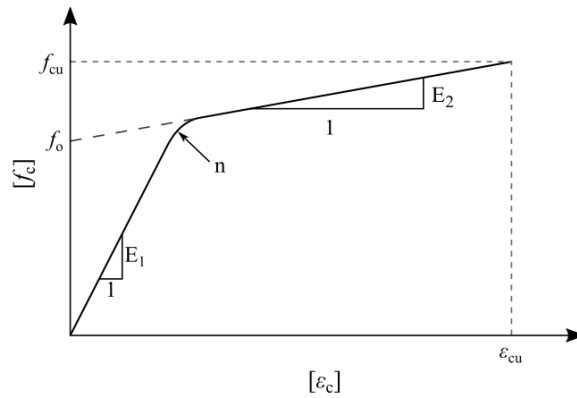


Figura 3.10 - Modelo de confinamento bilinear proposto por Samaan *et al.* (adaptado de [50])

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{f_o} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} + E_2 \varepsilon_c \quad (3.28)$$

Onde:

- E_1, E_2 – são os declives do primeiro e segundo ramos da curva de tensão-extensão axial;
- f_o – é a ordenada na origem do segundo ramo do diagrama;
- n – é um parâmetro de controlo da curvatura na zona de transição entre os dois ramos, neste estudo foi utilizado $n=1,5$.

Como foi explicado anteriormente, o encamisamento com CFRP corresponde a um reforço passivo, uma vez que o sistema de reforço começa a ser mobilizado somente quando se atingem valores de tensão próximos da tensão máxima do betão não confinado. Por essa razão, o declive do primeiro ramo depende exclusivamente das propriedades do betão e pode ser calculado através da expressão (3.29) [50].

$$E_1 = 3950 \sqrt{f_{co}} \quad (3.29)$$

Assim que o núcleo de betão se aproxima do valor da tensão máxima do betão não confinado, desenvolvem-se fissuras até ao ponto em que já não é possível descrever a relação entre a extensão

axial e a extensão lateral através do coeficiente de *Poisson*, e o encamisamento é então mobilizado como sistema de confinamento. Como tal, o declive do segundo ramo é função da rigidez do compósito e, de certa forma, da tensão de rotura do betão não confinado, ainda que em menor quantidade. Este declive é calculado através da expressão (3.30) [50].

$$E_2 = 245,61 f_{co}^{0,2} + 1,3456 \frac{E_j t_j}{D_j} \quad (3.30)$$

A ordenada na origem do segundo ramo do diagrama é função da tensão de rotura do betão não confinado e da tensão de confinamento conferida pelo encamisamento (f_i). Este parâmetro é calculado através da expressão (3.31) [50].

$$f_o = 0,872 f_{co} + 0,371 f_i + 62,58 \quad (3.31)$$

A tensão última do betão confinado e a correspondente extensão última são calculadas através das expressões (3.32) e (3.33), respetivamente [50].

$$f_{cu} = f_{co} + 6,0 f_i^{0,7} \quad (3.32)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f_{cc} - f_o}{E_2} \quad (3.33)$$

3.4. Confinamento com CFRCM

O confinamento de pilares de betão armado com sistemas de CFRCM pode ser utilizado para aumentar a resistência do betão e a ductilidade dos pilares.

3.4.1. Tensão lateral de confinamento

Como explicado anteriormente para o confinamento de betão com armaduras de aço e com CFRP, os pilares de betão com secção circular correspondem ao exemplo de reforço mais eficaz, em que a secção se considera totalmente confinada. O reforço através de FRCM não é exceção, e na Figura 3.11 ilustram-se as tensões presentes no encamisamento de um pilar circular confinado por esta técnica em toda a altura.

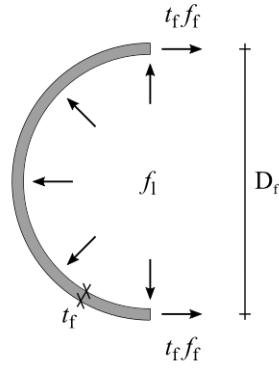


Figura 3.11 - Tensão lateral de confinamento com encamisamento de CFRM em secções circulares (adaptado de [52])

O cálculo da tensão lateral de confinamento do sistema CFRCM pode ser simplificado através do equilíbrio de forças horizontais. Considerando que a pressão exercida pelo sistema de FRCM sobre o núcleo do betão é uniforme ao longo do perímetro, determina-se a tensão lateral de confinamento (f_{lu}) através da expressão (3.34) [52].

$$f_{lu} = \frac{2 n_f t_f f_f}{D_f} \quad (3.34)$$

Onde:

- n_f — é o número de camadas de confinamento;
- t_f — é a espessura do material de confinamento;
- f_f — é a resistência à tração do material de confinamento;
- D_f — é o diâmetro da secção em compressão, medido em relação ao eixo médio do encamisamento.

3.4.2. Modelos teóricos

Nesta secção apresentam-se seis modelos, através dos quais é possível prever a tensão de compressão máxima e a extensão axial correspondente do betão confinado com CFRM. Para isso, vários autores desenvolveram modelos através de uma análise dos dados experimentais [53].

As expressões analíticas para o cálculo dos parâmetros f_{cc} e ε_{cc} , são habitualmente baseadas no pressuposto que estes parâmetros são função da tensão de confinamento última, f_{lu} . A tensão de compressão máxima do betão confinado e a extensão axial correspondente são calculadas através das expressões (3.35) e (3.36), respetivamente [54, 55].

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_1 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^m \quad (3.35)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + k_2 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^n \quad (3.36)$$

Onde:

- k_1, k_2, m e n - são constantes empíricas.

A relação entre as grandezas pode ser linear ($m=n=1$) ou não linear ($m=n\neq 1$). A eficácia de confinamento é quantificada através dos coeficientes k_1 e k_2 , que segundo a literatura podem variar num grande intervalo de valores. Esta abordagem já era comum para outro tipo de materiais compósitos mas de maneira a comparar a eficácia das diferentes técnicas é possível estender o uso das equações (3.35) e (3.36) ao FRCM, substituindo os coeficientes k_1 e k_2 por $k_{1,M}$ e $k_{2,M}$, como se mostra nas expressões (3.37) e (3.38) [54, 55].

$$k_1 = \alpha k_{1,M} \quad (3.37)$$

$$k_2 = \beta k_{2,M} \quad (3.38)$$

Onde:

- α, β - são coeficientes de eficácia do encamisamento;
- $k_{1,M}, k_{2,M}$ - são constantes empíricas para encamisamento com FRCM.

Os coeficientes $k_{1,M}$ e $k_{2,M}$ deverão ser avaliados individualmente, para cada sistema de confinamento, tendo em conta os diferentes tipos de fibras e o mecanismo de transferência de cargas na interface fibra/matriz [53]. Os coeficientes de eficácia α e β dependem do tipo de sistema de reforço (para o caso de encamisamento com FRCM são α_M e β_M) [54].

Os modelos que serão apresentados são: Triantafillou *et al.* (2006) [54], Di Ludovico *et al.* (2010) [55], De Caso y Bassalo *et al.* (2012) [56], ACI Committee 549 (2013) [41], Ombres (2014) [57] e por último Ombres e Mazzuca (2016) [53].

O modelo de Triantafillou *et al.* (2006) [54] foi proposto com base em ensaios realizados em pilares confinados com malhas têxteis de fibras de carbono (CFRCM). Para os modelos propostos por Di Ludovico *et al.* (2010) [55] e De Caso y Bassalo *et al.* (2012) [56] foram ensaiados pilares de betão confinados com malhas têxteis de fibras de vidro (GFRCM) e basalto (BRM). Na campanha que serviu de base para o modelo de Ombres (2014) [57] foram testados pilares confinados com malhas têxteis de PBO (Poly-p-Phenylene-Benzobisoxazole). Por fim o modelo de Ombres e Mazzuca (2016) [53] é baseado não só em ensaios realizados em pilares de betão com encamisamento de PBO-FRCM e CFRCM, mas também numa vasta base de dados disponíveis na literatura. As relações propostas nos estudos supracitados listam-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Modelos analíticos (adaptado de [53])

Modelo	Expressões Analíticas	
Triantafillou <i>et al.</i> (2006)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 1,90 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + \frac{0,046}{\varepsilon_{co}} \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)$
Di Ludovico <i>et al.</i> (2010)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2,35 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,85}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + \frac{0,018}{\varepsilon_{co}} \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,85}$
De Caso y Bassalo <i>et al.</i> (2012)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2,87 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,775}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + \frac{0,046}{\varepsilon_{co}} \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,775}$
ACI Committee 549 (2013)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3,1 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1,5 + 12 \frac{f_{lu}}{f_{co}} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45}$
Ombres (2014)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 5,286 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = \frac{0,041}{\varepsilon_{co}} \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,25} - 1,02$
Ombres e Mazzuca (2016)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 0,913 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,5}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 0,963 \left(\frac{f_{lu}}{f_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,5}$

No último estudo foram comparados todos os modelos da tensão de confinamento acima enunciados, tendo-se concluído que os modelos de De Caso y Bassalo (2012) [56] e Ombres (2014) [57] ofereciam resultados pouco conservativos, ao contrário dos modelos de Triantafillou *et al.* (2006) [54] e ACI Committee 549 [41], que produzem previsões mais próximas do observado nos ensaios experimentais [53].

Ombres e Mazzuca (2016) [53] também compararam as expressões analíticas da extensão axial propostas nos estudos já mencionados, tendo concluído que a dispersão dos resultados era demasiado elevada o que impossibilita a definição de uma só equação para a extensão axial sem erros elevados. Na verdade, todos os modelos fornecem resultados pouco conservativos, em particular os modelos Triantafillou *et al.* (2006) [54], De Caso y Bassalo *et al.* (2012) [56] e Ombres (2014) [57]. Com base no erro quadrático médio (EQM) de todos os modelos, o modelo ACI Committee 549 (2012) [41] é o mais preciso uma vez que utiliza a extensão efetiva de tração no encamisamento ε_{fe} , para o cálculo da extensão lateral e da extensão axial [53].

Salienta-se o facto dos modelos de Ombres (2014) [57] e Ombres e Mazzuca (2016) [53] calcularem a tensão de confinamento de maneira diferente, introduzindo um coeficiente de eficácia de tensão.

$$f_{lu} = \frac{1}{2} k_s \rho_f E_f \varepsilon_{fu} \quad (3.39)$$

$$k_s = 0,25 \left[\left(\frac{\rho_f E_f}{f_{co}} \right)^{0,3} - 1 \right] \quad (3.40)$$

$$\rho_f = \frac{4 n_f t_f}{D_f} \quad (3.41)$$

Onde:

- k_s - é o coeficiente de eficácia de tensão;
- ρ_f - é a relação volumétrica de FRCM;
- ε_{fu} - extensão de rotura à tração do FRCM.

Adicionalmente, a norma ACI Committee 549 [41] apresenta uma curva tensão-extensão axial para o betão confinado com FRCM, ilustrada na Figura 3.12. A curva é composta por dois ramos, o primeiro parabólico e o segundo linear, que são definidos matematicamente pelas expressões (3.42) e (3.43). A interseção dos dois ramos ocorre no ponto ε_t , que pode ser determinado segundo a expressão (3.44). O declive do troço linear (E_2) é calculado por meio da expressão (3.45).

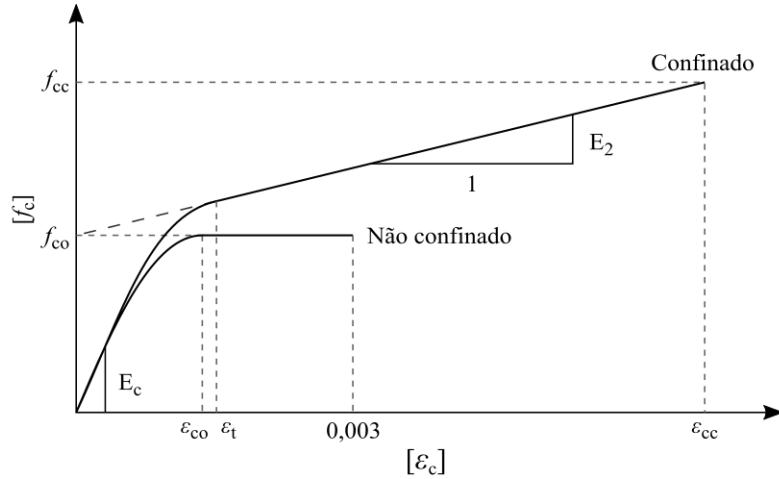


Figura 3.12 - Diagrama de tensão-extensão para o betão confinado com FRCM (adaptado de [41])

$$f_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f_{co}} (\varepsilon_c)^2, \text{ para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad (3.42)$$

$$f_c = f_{co} + E_2 \varepsilon_c, \text{ para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \quad (3.43)$$

$$\varepsilon_t = \frac{2 f_{co}}{E_c E_2} \quad (3.44)$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_{co}}{\varepsilon_{cc}} \quad (3.45)$$

Onde:

- E_c - é o módulo de elasticidade do betão;
- ε_c - é a extensão axial de compressão do betão;
- f_{co} - é a tensão de compressão máxima do betão não confinado;

- ε_{cc} - é a extensão axial correspondente à tensão máxima de compressão do betão.

A tensão de compressão máxima do betão confinado (f_{cc}) e a tensão lateral de confinamento (f_l) podem ser calculadas através das expressões (3.46) e (3.47), respetivamente.

$$f_{cc} = f_{co} + 3,1 k_a f_l \quad (3.46)$$

$$f_l = \frac{2 n_f A_f E_f \varepsilon_{fe}}{D_f} \quad (3.47)$$

Onde:

- k_a - é um coeficiente de eficácia que é função da secção transversal do pilar (no caso de secções circulares, toma o valor 1,0);
- A_f - é a área de malha têxtil por unidade de espessura;
- E_f - é o módulo de elasticidade do FRCM;
- ε_{fe} - é a extensão efetiva de tração no confinamento de FRCM;

A contribuição da argamassa para a resistência à compressão do pilar não deve ser tida em conta. A extensão última de compressão axial não deve exceder 0,01, de forma a controlar a fendilhação e garantir a integridade do betão (expressão (3.48)).

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1,5 + 12 k_b \frac{f_{lu}}{f_{co}} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right) \quad (3.48)$$

Onde:

- k_b - é um coeficiente de eficácia que é função da secção transversal do pilar (no caso de secções circulares, toma o valor 1,0).

A extensão efetiva de tração no confinamento é calculada por meio da expressão (3.49)

$$\varepsilon_{fe} = \min\{\varepsilon_{fu} ; 0,012\} \quad (3.49)$$

Capítulo 4. Estudo experimental do betão confinado

4.1. Introdução

O reforço de pilares de betão materializado através de FRPs, nomeadamente de carbono, aramida ou fibra de vidro, é uma técnica bastante recorrente na indústria, devido à sua eficácia. Porém, existe sempre a necessidade de inovar e melhorar. Como tal, a procura por novas soluções e materiais é uma constante. Este trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento do betão confinado com malha têxtil de fibras de carbono aplicada em argamassa estrutural.

Através da campanha experimental desenvolvida, pretendeu-se comparar o comportamento de pilares sujeitos a compressão uniaxial, confinados com dois materiais diferentes: CFRP e CFRCM.

Com este objetivo estabelecido, foram ensaiados doze modelos: dois modelos sem qualquer reforço, três modelos confinados com CFRP e por fim sete modelos confinados com CFRCM.

Neste capítulo apresentam-se os materiais utilizados para a realização dos modelos, as suas características, assim como os procedimentos e os equipamentos envolvidos em todo o processo.

4.2. Caracterização dos modelos

4.2.1. Geometria das secções transversais

Para caracterização dos sistemas de reforço, produziram-se doze modelos, de betão, de secção transversal circular com 200 mm de diâmetro e 700 mm de altura, como se apresenta na Figura 4.1.

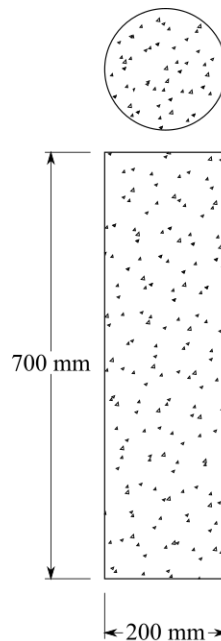


Figura 4.1 - Dimensões dos modelos

4.2.2. Pormenorização das armaduras

Na campanha experimental foram feitos não só pilares de betão simples, mas também de betão armado. Para todos os modelos de betão armado foi adotada a mesma pormenorização das armaduras longitudinais e transversais. Na Figura 4.2 apresenta-se um modelo e a respetiva distribuição da armadura. Para a armadura longitudinal tomaram-se varões de aço de 8 mm de diâmetro. A armadura transversal foi materializada por estribos de aço com 6 mm de diâmetro.

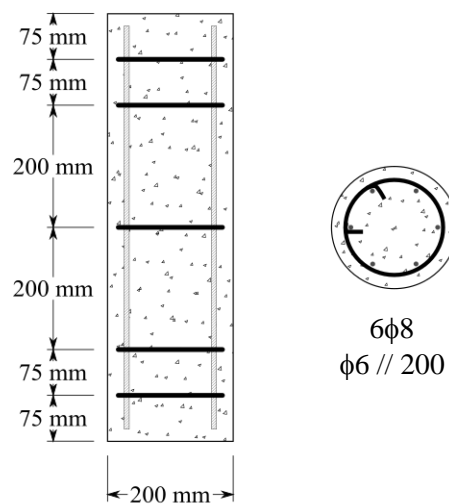


Figura 4.2 - Pormenorização das armaduras dos modelos de betão armado

4.2.3. Configuração das soluções de confinamento

Para o reforço dos modelos utilizaram-se dois tipos de compósitos: CFRP e *ARMO-mesh*®. O reforço de todos os pilares foi feito em toda a altura. Nos pilares não reforçados, um tinha armadura ordinária e o outro era de betão simples.

A notação utilizada na campanha para a identificação dos modelos começa com a letra “S” ou “C” se o modelo for de betão não armado ou armado, respetivamente. Posteriormente seguem-se as letras: “NR” para os modelos de referência, ou seja, não reforçados; “C_n” para modelos reforçados com CFRP; “A_n”, se o reforço for feito com o sistema *ARMO*; por último, o “n” indica o número de camadas de reforço aplicadas. No caso de o reforço ser o mesmo para determinados modelos, foi feita a diferenciação através dos dois últimos algarismos “01” ou “02”. Assim a notação “CA₁ – 01” refere-se ao primeiro pilar de betão armado reforçado com uma camada de *ARMO-mesh*®.

Na Tabela 4.1 identificam-se todos os modelos referentes às três séries de ensaios (reforçadas e de referência).

Tabela 4.1 - Modelos das séries da campanha experimental

Série	Descrição
SNR	Sem armadura
CNR	Com armadura
CC ₁	Com armadura, 1 camada de CFRP
CC ₂	Com armadura, 2 camadas de CFRP
CC ₃	Com armadura, 3 camadas de CFRP
CA ₁ - 01 CA ₁ - 02	Com armadura, 1 camada de <i>ARMO-mesh</i> ®
CA ₂ - 01 CA ₂ - 02	Com armadura, 2 camadas de <i>ARMO-mesh</i> ®
SA ₂	Sem armadura, 2 camadas de <i>ARMO-mesh</i> ®
CA ₃ - 01 CA ₃ - 02	Com armadura, 3 camadas de <i>ARMO-mesh</i> ®

4.2.4. Procedimento da aplicação do reforço

Uma vez que foram utilizados dois materiais de reforço distintos, também os métodos de aplicação são diferentes. Nesta secção descrevem-se ambos os processos de aplicação do reforço, para a manta de fibras de carbono e para a malha têxtil de fibras de carbono.

4.2.4.1. Manta de CFRP

A – Preparação da superfície do betão:

Nesta fase remove-se a leitada superficial do betão, de maneira a ter um bom suporte para a aplicação da resina reparadora. Desta forma eliminam-se poeiras e gorduras presentes na superfície e colmatam-se algumas irregularidades. Tudo isto é feito com recurso a uma rebarbadora equipada com um disco de cabeças de rebarbagem de carboneto de tungsténio (115 mm), como apresentado na Figura 4.3 - a.

B – Regularização da superfície do betão:

Antes de aplicar qualquer produto, removeram-se todas as poeiras através de ar comprimido. Como regularizador de superfície utilizou-se a resina de elevado desempenho *S&P Resin 220 HP*. Deste modo taparam-se todos os vazios superficiais e trataram-se todas as irregularidades como se mostra na Figura 4.3 - b. Aguardou-se 7 dias, para que a resina endurecesse, e com recurso a uma rebarbadora com um disco de lamelas (115 mm) retirou-se o excesso de resina. Desta forma suavizou-se a superfície de maneira a não haver excesso de resina que comprometesse o confinamento dos tecidos de CFRP. Na Figura 4.3 - c apresenta-se este processo.

C – Aplicação da resina epóxida:

Após a regularização da superfície aplicou-se uma primeira camada de *S&P Resin 55 HP* de forma a garantir uma boa ligação entre a superfície de betão e o reforço (Figura 4.3 - d). O *pot-life* desta resina é de 45 minutos, de acordo com a respetiva ficha técnica. Este tempo é suficiente para reforçar um pilar por inteiro. Este processo foi realizado com recurso a mini rolo de 11 cm (rolo da esquerda apresentado na Figura 4.3 – g).

D – Aplicação dos tecidos de CFRP:

Depois de aplicada uma primeira camada de resina, colocaram-se os tecidos de CFRP pressionando ligeiramente o reforço contra a superfície, com recurso ao rolo (Figura 4.3 - e). Desta forma os tecidos aderiram por completo ao betão, não havendo assim necessidade de usar mecanismos para o suporte das mesmas. Cada camada foi aplicada de forma contínua e foram previstos 15 cm de emenda na fase de corte das fibras, com a finalidade de prevenir a delaminação precoce aquando do ensaio. As emendas foram colocadas em sítios diferentes entre camadas para que não coincidissem.

E – Aplicação da resina epóxida saturante:

Por fim foi necessário aplicar uma nova camada de resina para impregnar as fibras de carbono. Com auxílio do rolo (Figura 4.3 - f) aplicou-se a resina e pressionou-se ligeiramente no sentido em que a fibra foi aplicada, de forma a ancorá-la. No último passo, utilizou-se um rolo de laminagem (rolo da direita apresentado na Figura 4.3 - g) para retirar bolhas de ar que possam ter ficado nas fibras assim como o excesso de resina.



Figura 4.3 - Procedimento de aplicação das tecidos de CFRP

4.2.4.2. Sistema ARMO-mesh®

A – Preparação da superfície do betão:

À semelhança do procedimento adotado para os tecidos de fibras de carbono, nesta fase removeu-se a leitada superficial do betão, de maneira a ter um bom suporte para a aplicação da argamassa. Desta forma eliminam-se poeiras e gorduras presentes na superfície e colmatam-se algumas irregularidades. Tudo isto é feito com recurso a uma rebarbadora, equipada com uma mó acoplada (110 mm, Figura 4.4 - a).

B – Aplicação da argamassa estrutural:

Foi necessário saturar a superfície do betão durante 48 horas antes da aplicação da argamassa, para que o betão não absorvesse a água da argamassa (Figura 4.4 - b). Com recurso a jato de ar comprimido removeram-se poeiras, pós e gorduras que pudessem estar na superfície. Feito isto e com a argamassa pronta, aplicou-se uma camada com cerca de 10 mm (Figura 4.4 - c). A argamassa foi projetada manualmente com colher de pedreiro (Figura 4.4 - h).

C – Aplicação da malha de carbono:

Logo a seguir a aplicar a primeira camada de argamassa, aplicou-se a malha de carbono. Esta foi embebida na argamassa ainda fresca, de maneira a fixá-la (Figura 4.3 - d). Cortada previamente, previu-se 30 cm de emenda para a malha.

D – Acabamento:

Para finalizar aplicou-se uma nova camada de argamassa estrutural com cerca de 5 mm (Figura 4.4 - e). Para os modelos em que o reforço era composto por mais de uma camada, repetiu-se o processo, as camadas intermédias com sensivelmente 10 mm e a última camada com 5 mm. O acabamento foi realizado com a passagem de uma talocha metálica (Figura 4.4 - f) de forma a obter uma superfície lisa.

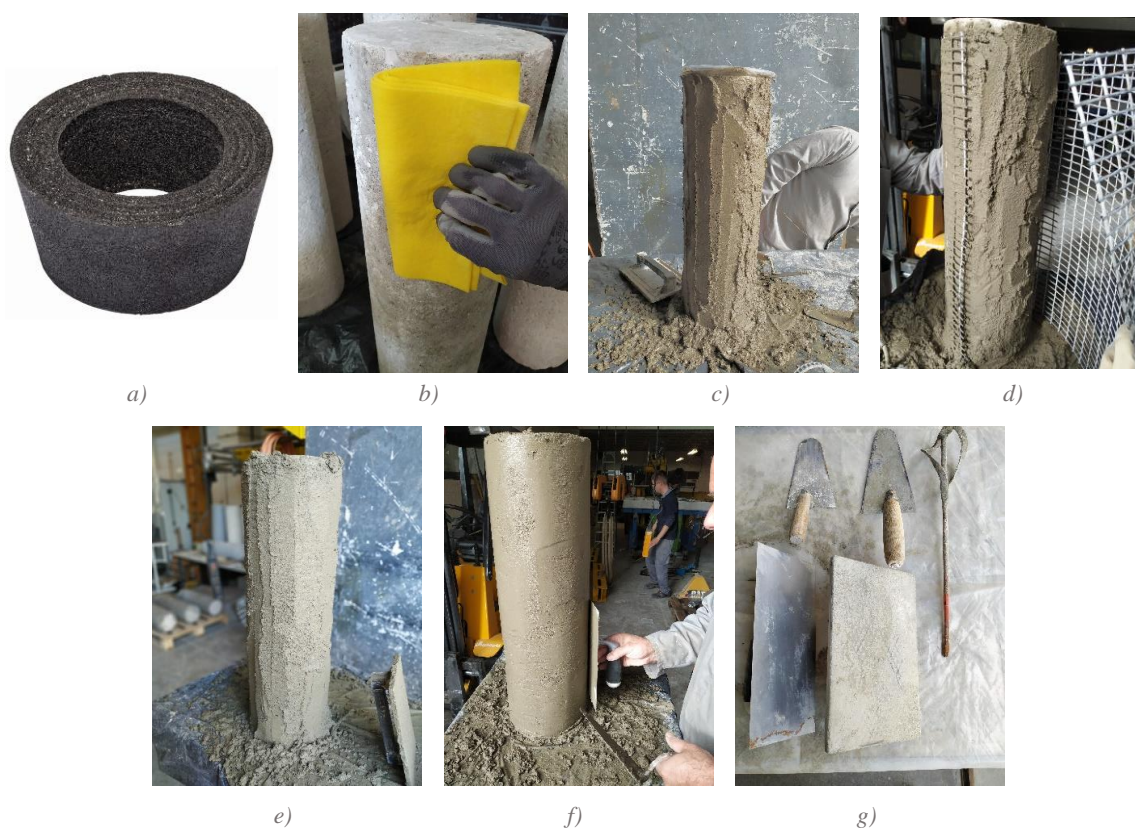


Figura 4.4 - Procedimento de aplicação da malha têxtil de fibras de carbono

4.3. Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados na campanha experimental foram: armaduras de aço, o betão, a resina epóxida, os tecidos de CFRP, a argamassa estrutural e a malha de carbono. Nesta secção são apresentadas as propriedades de todos os materiais utilizados na campanha.

4.3.1. Aço

Os pilares de betão foram armados longitudinalmente com varões de aço de classe A 500 NR SD de 8 mm de diâmetro e transversalmente com estribos de aço de classe A 500 NR SD_E de 6 mm de diâmetro.

Todas as armaduras foram preparadas pela *Concremat* e a caracterização das suas propriedades, foi conseguida através de ensaios à tração, tanto nos varões de 8 mm como de 6 mm de diâmetro. Estes dados foram fornecidos pela mesma empresa, dos quais se destacam os valores médios da tensão de cedência do aço, da tensão de rotura do aço e ainda da extensão do aço para o ponto de tensão máxima, que são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características dos varões de aço de 6mm e 8mm de diâmetro

Diâmetro (mm)	f_{sym} (MPa)	f_{sum} (MPa)	A_{gt} (%)
6	557,0	654,0	12,1
8	531,0	632,0	11,8

Onde:

- f_{sym} — é o valor médio da tensão de cedência do aço;
- f_{sum} — é o valor médio da tensão de rotura do aço;
- A_{gt} — é a extensão do aço para o ponto de tensão máxima.

Posteriormente as armaduras foram dispostas nas cofragens, cortadas *a priori*, como se apresenta na Figura 4.5. Como se pode ver, as armaduras foram suspensas com um arame num varão de diâmetro de 3 mm para garantir um recobrimento longitudinal de 20 mm.



Figura 4.5 - Disposição das armaduras nas cofragens: a) vista geral das cofragens e b) armaduras suspensas nas cofragens com varão de 3 mm

4.3.2. Betão

Os pilares utilizados no estudo foram todos betonados na FCT. Para isso foi produzido um betão com uma razão de 1:3:4 para cimento, areia e brita, respetivamente.

Para este estudo construíram-se doze pilares (geometria descrita na secção 4.2.1) e, por forma a caracterizar o betão utilizado no processo, consideraram-se também doze cubos de 15 cm de aresta e seis cilindros de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Na Tabela 4.3 listam-se as quantidades de betão a produzir para todas as peças.

Tabela 4.3 - Tabela de quantidades de betão

		Cubos	Cilindros	Pilares
Área unitária	(m ²)	0,0225	0,0177	0,0314
Volume unitário	(m ³)	0,0033	0,0053	0,0219
Exemplares		12	6	12
Volume subtotal	(m ³)	0,0405	0,0318	0,2638
	(dm ³)	40,5	31,8	263,8

Em suma, o volume total de betão a produzir é de 336 dm³. Considerando então a razão adotada e o volume total de betão, foi possível saber o volume correspondente a cada material.

Para a brita tomou-se o volume total de betão mais 10%, por forma a considerar possíveis perdas. Uma vez que a areia ocupa os espaços vazios da brita, considerou-se o volume de areia igual a 3/4 do volume de brita. Por fim, para o cimento considerou-se 1/3 do volume de areia. Estes volumes calculam-se através das expressões (4.1), (4.2) e (4.3). Na Tabela 4.4 apresenta-se o resultado deste processo.

$$V_{\text{brita}} = 1,1 \times V_{\text{total betão}} \quad (4.1)$$

$$V_{\text{areia}} = \frac{3}{4} \times V_{\text{brita}} \quad (4.2)$$

$$V_{\text{cimento}} = \frac{1}{3} \times V_{\text{areia}} \quad (4.3)$$

Tabela 4.4 - Volumes de agregados e ligantes do betão

	Volume (dm ³)
Brita	369,6
Areia	277,2
Cimento	92,0

Correlacionando o volume com a baridade, determina-se o peso de material necessário para a mistura. Assim sendo, procedeu-se ao cálculo da baridade da areia e da brita de acordo com a norma *NP EN 1097-3:2002* [58].

Para isso foram pesados dois recipientes vazios (m_1) de volume conhecido, um de 0,3022 dm³ para a areia e outro de 0,7390 dm³ para a brita. De seguida o recipiente foi cheio com a ajuda de uma pá até transbordar. Feito isto, a superfície foi nivelada com a ajuda de uma régua metálica e, seguidamente, foi pesado o recipiente cheio (m_2). Este processo foi repetido três vezes, e fez-se a média dos três valores. A baridade é calculada através da expressão (4.4) [58].

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.4)$$

Onde:

- ρ_b - é a baridade, em quilogramas por decímetro cúbico;
- m_1 - é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;
- m_2 - é a massa do recipiente cheio, em quilogramas;
- V - é a capacidade do recipiente, em decímetros cúbicos.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores resultantes do cálculo da baridade para a areia e para a brita. Uma vez determinada a baridade dos agregados do betão, é possível saber as quantidades a pesar de cada agregado para a mistura do betão, correlacionando os volumes da Tabela 4.4 com a baridade (Tabela 4.6).

Tabela 4.5 - Valores de cálculo da baridade

	m_1 (kg)	m_2 (kg)	$\overline{m_2}$ (kg)	V (dm ³)	ρ_b (kg/dm ³)
Areia	0,6705	1,740	1,739	0,7390	1,4
		1,732			
		1,744			
Brita	0,20523	0,5725	0,5785	0,3022	1,2
		0,5894			
		0,5734			

Tabela 4.6 - Volume, baridade e peso dos agregados da mistura do betão

	Volume (dm³)	Baridade (kg/dm³)	Peso (kg)
Brita	369,6	1,2	443,5
Areia	277,2	1,4	388,1

Para a betonagem foi utilizada uma betoneira móvel de eixo inclinado, apresentada na Figura 4.6. Na Tabela 4.7 são listadas as propriedades da betoneira.

Tabela 4.7 - Propriedades da betoneira utilizada

Betoneira	
Modelo	Lis 180
Capacidade do balde	180 L
Capacidade de mistura	140 L
Número de pás	3
Descarga	Direta



Figura 4.6 - Betoneira utilizada na betonagem

Uma vez que a betoneira disponível para este processo tinha capacidade de apenas 140 L de mistura, foi necessário fasear a mistura em seis grupos diferentes. Por forma a dividir os pesos equitativamente pelos seis grupos arredondou-se o peso da brita para 444,0 kg, da areia para 390,0 kg e do cimento para 92,4 kg. Assim foi possível pesar quantidades exatas minimizando eventuais diferenças entre as betonagens. Na Tabela 4.8 são apresentados os valores a pesar para cada grupo de betonagem.

Tabela 4.8 - Tabela de pesos dos materiais constituintes do betão

Mistura		Total	Betonagem
Cimento	(kg)	92,4	15,4
Areia	(kg)	390,0	65,0
Brita	(kg)	444,0	74,0

O cimento utilizado na mistura foi um cimento *portland* de calcário CEM II/B-L 32,5 N. Posto isto, procedeu-se então à betonagem. Todas as peças foram betonadas sobre uma plataforma de madeira devidamente nivelada.

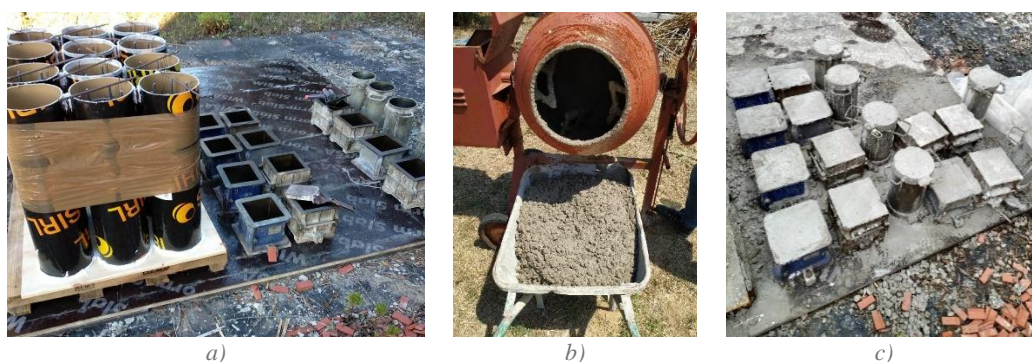


Figura 4.7 - Betonagem: a) disposição inicial; b) betonagem indireta com recurso a carrinho de mão e c) resultado da betonagem

As propriedades mecânicas do betão foram obtidas através de ensaios de compressão uniaxial em provetes cúbicos e ensaios de compressão diametral em provetes cilíndricos. Os provetes foram produzidos de acordo com o preconizado na norma *NP EN 206-1: 2007* [59].

Para a resistência à compressão do betão foram ensaiados doze provetes cúbicos de 150 mm de aresta (Figura 4.8). Este ensaio foi efetuado aos 213 dias, idade correspondente aos ensaios dos modelos da campanha experimental. Recorreu-se a uma prensa hidráulica (que será apresentada na secção 4.4.1), através da qual se aplicou uma taxa de carregamento de 11,25 kN/s ou 0,5 MPa/s (a norma *NP EN 12390-3: 2011* [60] estabelece um intervalo de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s) [60].



Figura 4.8 - Ensaio de resistência à compressão em cubos de betão

De acordo com a norma *NP EN 12390-3: 2011*, a resistência à compressão do betão é dada pela expressão (4.5) [60].

$$f_{\text{comp}} = \frac{F_c}{A_{\text{comp}}} \quad (4.5)$$

Onde:

- f_{comp} - é a resistência à compressão do betão;
- F_c - é a carga máxima à rotura;
- A_{comp} - é a área da secção transversal do provete na qual a carga é aplicada.

Na Tabela 4.9 listam-se os resultados dos ensaios de rotura à compressão em cubos de betão, onde $f_{ci, \text{ cubos}}$ é a resistência à compressão de um provete cúbico individual, $f_{cm, \text{ cubos}}$ é a resistência à compressão média dos provetes cúbicos e $f_{cm, \text{ cilindros}}$ representa a resistência média à compressão em cilindros que corresponde a 80% da resistência à compressão dos cubos, sendo que esta correlação é uma aproximação [59].

A norma *NP EN 206-1: 2007* estabelece que a resistência individual de cada provete não deve ter uma variação maior que 15% da média dos resultados [59].

Tabela 4.9 - Tensão de rotura à compressão do betão

Tipo de provete	Nº do provete	F _c (kN)	A _{comp} (m²)	<i>f_{ci cubos}</i> (MPa)	<i>f_{cm cubos}</i> (MPa)	Média _{cubos} (MPa)	Variação (%)	<i>f_{cm cilindros}</i> (MPa)	Média _{cilindros} (MPa)
Cúbico	1	356,0	0,0225	15,8	16,4	14,8	6,85%	13,1	11,9
	2	383,0	0,0225	17,0			14,96%		
	3	319,0	0,0225	14,2	14,3		-4,25%	11,5	
	4	326,0	0,0225	14,5			-2,15%		
	5	335,0	0,0225	14,9	14,4		0,55%	11,6	
	6	315,0	0,0225	14,0			-5,45%		
	7	335,0	0,0225	14,9	14,8		0,55%	11,8	
	8	330,0	0,0225	14,7			-0,95%		
	9	363,0	0,0225	16,1	15,9		8,95%	12,7	
	10	353,0	0,0225	15,7			5,95%		
	11	294,0	0,0225	13,1	13,0		-11,76%	10,4	
	12	289,0	0,0225	12,8			-13,26%		

Através do ensaio de compressão diametral obteve-se a resistência à tração do betão. Foram ensaiados seis provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Este ensaio foi também realizado aos 213 dias e realizado na mesma prensa, porém com uma adaptação para os provetes cilíndricos como se mostra na Figura 4.9.

A norma *NP EN 12390 – 6: 2003* define a taxa de carregamento através da expressão (4.6) [61].

$$R = \frac{i \pi}{2 L D_c} \quad (4.6)$$

Onde:

- R - é a taxa de carregamento;
- L - é o comprimento do provete;
- D_c - é o diâmetro do provete cilíndrico de betão;
- i - é o incremento de tensão que deverá ser escolhido de um intervalo de 0,04 a 0,06 MPa/s, pelo que se adotou um valor intermédio de 0,05 MPa/s.

Na Tabela 4.10 apresentam-se os valores utilizados para o cálculo da taxa de carregamento R.

Tabela 4.10 - Valores de cálculo para a taxa de carregamento no ensaio de compressão diametral

L	(mm)	300
D_c	(mm)	150
i	(Pa/s)	5 x 10 ⁴
R	(N/s)	2,18



Figura 4.9 - Sistema de ensaio em provetes cilíndricos de betão

De acordo com a norma *NP EN 12390 – 6: 2003*, a resistência à tração do betão é dada pela expressão (4.7) [61].

$$f_{ct, sp} = \frac{2 F_{sp}}{\pi L D_c} \quad (4.7)$$

Onde:

- $f_{ct, sp}$ - é a resistência à tração do betão no ensaio de compressão diametral;
- F_{sp} - é a carga máxima à rotura.

Através da expressão (4.8) do EC2 [62], é possível determinar a resistência à tração pura (f_{ct}) através da resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct, sp}$). Na Tabela 4.11 exibem-se os resultados dos ensaios de compressão diametral, onde f_{ctm} representa o valor médio da tensão de rotura à tração do betão.

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct, sp} \quad (4.8)$$

Tabela 4.11 - Tensão de rotura à tração do betão, através de compressão diametral

Tipo de provete	Nº do provete	Idade (dias)	F_{sp} (kN)	D_c (m)	L (m)	$f_{ct, sp}$ (MPa)	f_{ct} (MPa)	f_{ctm} (MPa)
Cilíndrico	13	213	110,0	0,15	0,30	1,56	1,40	1,33
	14	213	103,0	0,15	0,30	1,46	1,31	
	15	213	102,0	0,15	0,30	1,44	1,30	
	16	213	108,0	0,15	0,30	1,53	1,38	
	17	213	120,0	0,15	0,30	1,70	1,53	
	18	213	82,0	0,15	0,30	1,16	1,04	

4.3.3. Resina epóxida

4.3.3.1. De reparação

Antes de aplicar os tecidos de carbono houve necessidade de regularizar a superfície dos modelos CC. Para tal foi utilizada a *Resin 220 HP*, que é um adesivo epóxido bi-composto de elevado desempenho. Este processo foi realizado com recurso a uma espátula simples. As propriedades da resina foram obtidas com base na ficha técnica do fabricante (que pode ser consultada em Anexo) e resumem-se na Tabela 4.12. Na Figura 4.10 apresenta-se o resultado da aplicação da resina reparadora.

Tabela 4.12 - Propriedades da Resin 220 HP, segundo o fabricante [63]

Módulo de elasticidade	N/mm ²	≥ 7100
Trabalhabilidade (<i>pot-life</i> 23 °C)	Minutos	90
Resistência à compressão	N/mm ²	≥ 83
Temperatura de transição vítrea (T_g)	°C	58,2
Relação de mistura	Em peso	2 : 1 (A:B)
Temperatura de aplicação	°C	Entre +8 e +35
Seco ao tato após	Horas	4
Tempo de endurecimento	Dias	7



Figura 4.10 - Pilar com S&P Resin 200 HP aplicado na superfície

4.3.3.2. De laminação

Para a aplicação dos tecidos de CFRP foi utilizada a *Resin 55 HP*, uma resina epóxida bi-componente, com base de resina e endurecedor poliamida. Esta resina foi utilizada com a finalidade de colar os tecidos de carbono mas também de impregnar as fibras (Figura 4.11). Na Tabela 4.13 especificam-se as propriedades deste adesivo, com base na ficha técnica do fabricante (que pode ser consultada em Anexo).

Tabela 4.13 - Propriedades da Resin 55 HP, segundo o fabricante [64]

Módulo de elasticidade	N/mm ²	≥ 3200
Trabalhabilidade (<i>pot-life</i>)	Minutos	45
Resistência à compressão	N/mm ²	≥ 100
Temperatura de transição vítrea (T _g)	°C	53,5
Alongamento à rotura	%	1,73
Relação de mistura	Em peso	4,2 : 1,8 (A:B)
Temperatura de aplicação	°C	Entre +8 e +35
Seco ao tato após	Horas	4
Tempo de endurecimento	Dias	7



Figura 4.11 - Aplicação da resina de laminação

4.3.4. CFRP

Na campanha experimental, três modelos foram confinados com manta de carbono. Esta manta, *S&P C-Sheet 240* (200 g/m²), é unidirecional e na Tabela 4.14 indicam-se as propriedades da mesma, de acordo com a ficha técnica do fabricante (que pode ser consultada em Anexo). Os tecidos encontram-se disponíveis em rolos de 30 cm, assim foram cortadas tiras de 5, 10, 15, 20 e 30 cm de largura e com 78 cm de comprimento, dos quais foram contabilizados 15 cm para emenda.

Tabela 4.14 - Propriedades dos tecidos de fibras de carbono, segundo o fabricante [65]

Módulo de elasticidade	kN/mm ²	≥ 240
Resistência à tração	N/mm ²	≥ 4400
Peso da fibra longitudinal	g/m ²	200
Gramagem	g/m ²	230
Densidade	g/cm ³	1,77
Extensão de rotura	%	1,8
Espessura	mm	0,113



Figura 4.12 - Manta de CFRP na fase de corte

4.3.5. Malha têxtil de fibras de carbono

Os modelos da série CA e SA foram reforçados com a malha *ARMO-mesh® L500*, uma malha têxtil unidirecional de fibras de carbono de elevada resistência. A malha tem um revestimento de sílica amorfa que facilita a aderência entre a malha e a matriz, sendo aplicada conjuntamente com uma argamassa estrutural e é distribuída em rolos de 1,95 m de largura, pelo que foi necessário seccioná-la em áreas menores. Foram preparadas secções com 65 cm x 96 cm de altura e comprimento, respetivamente (Figura 4.13). Foi adotada uma altura de 65 cm de forma a garantir que não havia contacto direto entre a malha e os pratos da prensa, garantindo assim um funcionamento do reforço somente à tração, para confinar os cilindros. O comprimento de 96 cm tem prevista uma emenda de 30 cm.

Na Tabela 4.15 enunciam-se as propriedades deste material, tendo como base a ficha técnica do fabricante (que pode ser consultada em Anexo).

Tabela 4.15 - Propriedades da malha de carbono ARMO-mesh® L500, segundo o fabricante [66]

Módulo de elasticidade	kN/mm ²	≥ 240
Resistência à tração	kN/mm ²	≥ 4300
Densidade	g/cm ³	1,78
Extensão de rotura	%	1,8
Espessura da fibra de carbono	mm	0,105
Força última de tração	kN/m	450



Figura 4.13 - Fase de corte do ARMO-mesh® L500

4.3.6. Argamassa estrutural

O reforço por CFRCM combina os têxteis com matrizes inorgânicas, como explicado anteriormente. A argamassa *ARMO-crete®*, utilizada como matriz, trata-se de uma argamassa de polímero, fibras poliméricas e agregados selecionados [67]. Esta argamassa é habitualmente

aplicada por projeção com equipamento apropriado, porém na campanha experimental foi aplicada manualmente, estando ambos os procedimentos preconizados na ficha técnica do produto. Na Tabela 4.16 listam-se as propriedades da argamassa com base na ficha técnica do fabricante (que pode ser consultada em Anexo).

Tabela 4.16 - Propriedades da argamassa estrutural, ARMO-crete®, segundo o fabricante [67]

	N/mm ²	≥ 20 (1 dia)
Resistência à compressão	N/mm ²	≥ 40 (7 dias)
	N/mm ²	≥ 55 (28 dias)
Módulo de elasticidade em compressão	N/mm ²	≥ 25000
Vida útil	minutos	40
Consumo	kg/m ² por cm de espessura	~ 20,5
Temperatura de aplicação	°C	5 - 30
Espessura de aplicação por camada	mm	5 - 55

A dosagem de água sugerida pelo fabricante na embalagem é de 3,6 L a 3,8 L para 25 kg de argamassa, pelo que se adotou uma dosagem de 3,7 L de água. A mistura foi feita recorrendo a uma misturadora mecânica com uma duração de 3 minutos até se ter um produto homogêneo e sem grumos, como preconizado na ficha técnica do produto. Para cada amassadura produzida para o reforço dos pilares, foram ainda produzidos três provetes com a argamassa para caracterização da mesma. Estes provetes foram produzidos segundo a norma *BS EN 1015 – 11: 1999*, com dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm [68].

Para a caracterização da argamassa foram feitos ensaios de resistência à tração por flexão numa prensa *Zwick Z050*, de acordo com os procedimentos da norma *BS EN 1015 – 11: 1999* [68]. Na Figura 4.14 apresenta-se a prensa utilizada e o sistema de ensaio.



a)



b)

Figura 4.14 - Ensaio de resistência à tração por flexão em provetes de argamassa: a) prensa utilizada e b) sistema de ensaio

A resistência à tração por flexão ($f_{ct, fl}$) é calculada através da expressão (4.9) [68].

$$f_{ct, fl} = 1,5 \frac{F_{fl} l}{b d^2} \quad (4.9)$$

Onde:

- F_{fl} - é a força máxima aplicada ao provete;
- l - é a distância entre os eixos dos rolos de suporte;
- d - é a altura do provete;
- b - é a largura do provete.

As dimensões d e l são esquematizadas na Figura 4.15, sendo a largura do provete (b) perpendicular ao plano desta figura.

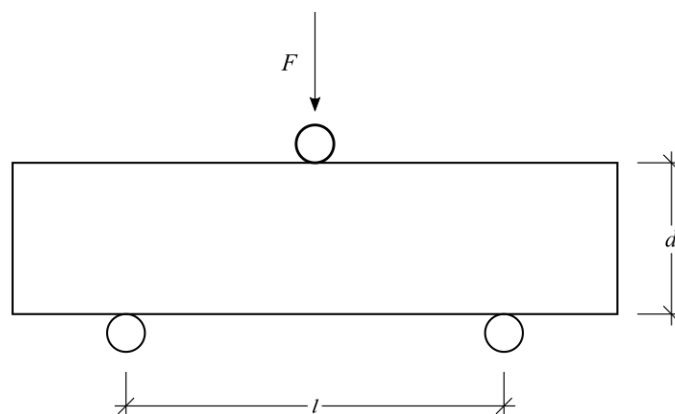


Figura 4.15 - Dimensões do sistema de ensaio de resistência à flexão da argamassa (adaptado de [68])

A resistência média à tração por flexão da argamassa foi de 8,1 N/mm². Os resultados destes ensaios podem ser consultados em Apêndice.

Deste ensaio resultaram quarenta e duas metades de provetes de argamassa que foram utilizadas para caracterizar a resistência à compressão. Este ensaio foi conduzido segundo os procedimentos da mesma norma [68]. Uma vez que esta argamassa é estrutural e reforçada, este ensaio teve de ser realizado na prensa já utilizada anteriormente nos ensaios de caracterização do betão (que será apresentada na secção 4.4.1), com uma adaptação para os provetes de argamassa (Figura 4.16). Este sistema de ensaio garante que a compressão é aplicada a uma área de 40 mm x 40 mm do provete.



Figura 4.16 - Sistema de ensaio de resistência à compressão de argamassa

A norma estabelece um intervalo de velocidades de carregamento que compreende valores de 50 a 400 N/s [68]. Para este ensaio adotou-se uma velocidade de 300 N/s.

A resistência à compressão da argamassa é determinada através da expressão (4.5), substituindo a área do betão pela área da argamassa. A resistência média à compressão da argamassa foi de 45,7 N/mm² e os resultados são tabelados em Apêndice.

Durante a campanha experimental, constatou-se que esta argamassa é bastante sensível às condições ambientais em que é aplicada e também à quantidade de água utilizada no processo, pequenas diferenças na quantidade de água podem afetar consideravelmente a trabalhabilidade e a consistência da mesma.

4.4. Ensaios experimentais

4.4.1. Equipamento de ensaio e aquisição de dados

Todos os ensaios foram realizados numa prensa, de compressão uniaxial, *Form+Test*. Esta é uma prensa de classe 1 servocontrolada através da qual é possível aplicar forças até 3000 kN ou deslocamentos até 50 mm.

Para a medição e registo de todos os dados de força, deslocamentos e extensões foi utilizado um sistema de aquisição de dados (*HBM DataAcquisition Spider 8*) dotado de oito canais de entrada ligado a um computador. Para a recolha das leituras recorreu-se a um *software* (*CATMAN 6.0*), e posteriormente efetuou-se a exportação das mesmas para uma folha de cálculo (*Excel*) por forma a tratar os resultados. Na Figura 4.17 apresenta-se a visão geral do sistema de ensaios.



Figura 4.17 - Visão geral do sistema de ensaio

Em relação ao procedimento de ensaio o mesmo foi controlado aplicando-se, a todos os modelos, um deslocamento constante de 0,01 m/s.

4.4.2. Instrumentação

Em todos os ensaios foram utilizados quatro transdutores de deslocamentos verticais para medir o encurtamento dos modelos quando sujeitos a compressão e os modelos da série CC foram equipados com seis extensómetros eléctricos colados na superfície das fibras para registo da extensão lateral.

As características dos transdutores de deslocamentos verticais são sumarizadas na Tabela 4.17. Os transdutores foram posicionados um em cada canto, estando fixos ao prato inferior da prensa

através de bases magnéticas. Na Figura 4.18 apresentam-se os dois tipos de transdutores utilizados nos ensaios. Foram utilizados três CDP-100 e um CDP-50.

Tabela 4.17 - Características dos transdutores de deslocamentos verticais (adaptado de [69])

Marca	Tipo	Capacidade	Resistência
TML	CDP-50	50 mm	350 Ω
TML	CDP-100	100 mm	350 Ω



Figura 4.18 - Transdutores de deslocamentos verticais utilizados nos ensaios [69]

Os valores registados pelos transdutores de deslocamento vertical foram utilizados para calcular a extensão média axial do betão, através da média das leituras obtidas pelos quatro equipamentos.

A instrumentação dos ensaios teve a mesma configuração para as séries de referência, SNR e CNR e para as séries CA e SA, como se exemplifica na Figura 4.19.

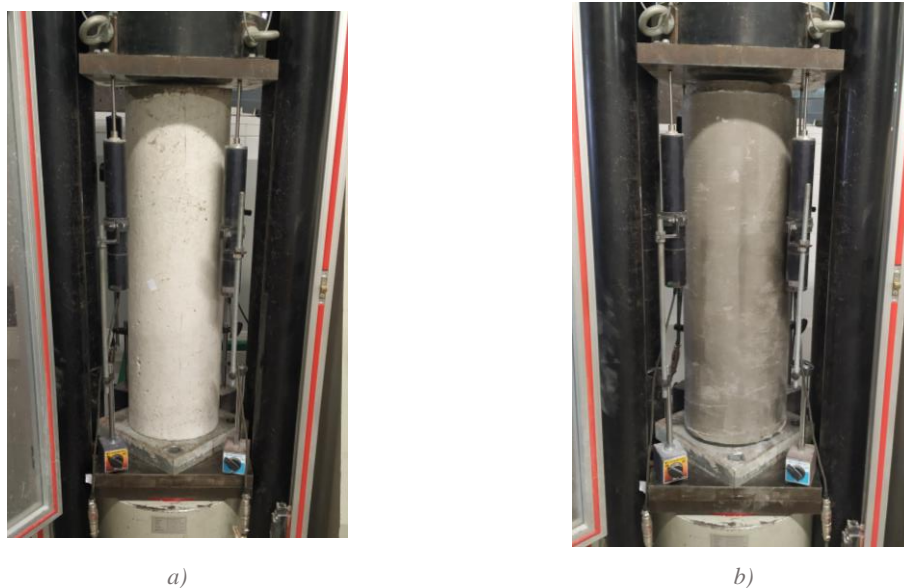


Figura 4.19 - Exemplo da instrumentação dos modelos: a) CNR e b) CA1-01

Na Figura 4.20 ilustra-se a configuração dos extensómetros eléctricos utilizados nos ensaios da série CC. Estes foram colocados segundo a direção perpendicular ao eixo dos modelos, de forma a registar a extensão lateral do modelo, correspondente à extensão do material compósito. Os extensómetros só foram utilizados nestes modelos, uma vez que seria extremamente difícil registar a extensão no betão, na argamassa e sobretudo na malha têxtil. Contrariamente aos transdutores de deslocamentos, foram utilizadas as leituras do extensómetro mais solicitado.

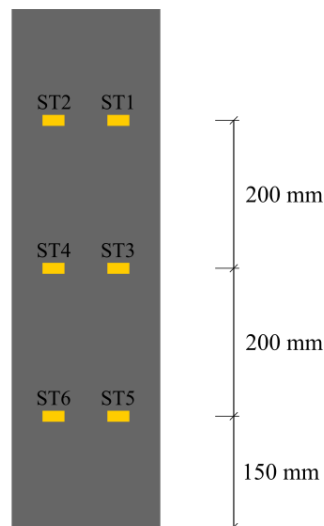


Figura 4.20 - Posicionamento dos extensómetros num modelo da série CC

Na Figura 4.21 é exemplificada a configuração do ensaio de um modelo da série CC com os quatro transdutores de deslocamento verticais e os seis extensómetros eléctricos colados segundo o esquema acima apresentado.



Figura 4.21 - Exemplo de um modelo da série CC devidamente instrumentado

Capítulo 5. Ensaios experimentais

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de compressão à rotura dos modelos de pilares de betão reforçados com tecidos de fibras de carbono, malha têxtil de fibras de carbono e também dos modelos de referência.

Por cada ensaio é apresentado um diagrama força axial – extensão axial, com a exceção dos modelos da série CC nos quais se apresenta, no mesmo gráfico, uma curva referente à extensão lateral. É de salientar que se adotou como extensão positiva o encurtamento, correspondente à extensão axial, e como extensão negativa o alargamento da secção, ou seja, a extensão lateral.

Os resultados são apresentados por séries, para que a análise seja mais direta. Apresentam-se adicionalmente algumas fotografias do estado final dos modelos, através das quais é possível identificar o modo de rotura.

5.2. Resultados experimentais

5.2.1. Série SNR

Este modelo corresponde ao modelo mais simples da campanha experimental, composto somente de betão simples, servindo de modelo de referência para a série SA. A força de compressão máxima registada no betão não confinado foi de 325,9 kN, com uma extensão axial correspondente de 0,26 %. Na Figura 5.1 apresenta-se a curva força-deformação do modelo SNR. A rotura deste modelo deu-se na parte inferior, como se mostra na Figura 5.2.

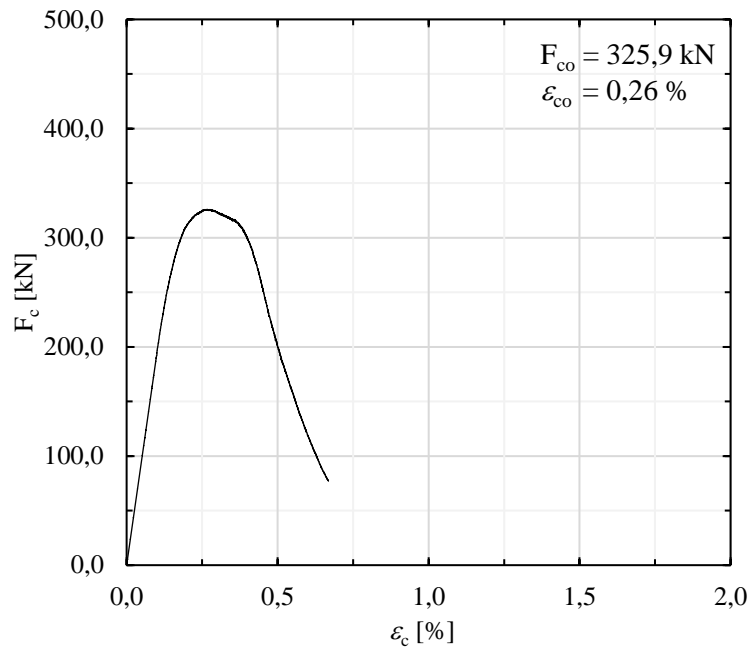


Figura 5.1 - Diagrama força-deformação do modelo SNR, da série de referência



Figura 5.2 - Modo de rotura, modelo SNR

5.2.2. Série CNR

O modelo CNR é o modelo de referência para a maioria dos modelos do programa experimental, composto simplesmente por betão armado. Neste ensaio registou-se uma tensão de compressão máxima no betão não confinado de 385,2 kN, com uma extensão axial correspondente de 0,38 %. Na Figura 5.3 expõe-se a curva força-deformação do modelo CNR. Este pilar também teve a rotura na parte inferior (Figura 5.4 – a), ocorrendo um destacamento das armaduras longitudinais, como se apresenta na Figura 5.4 – b.

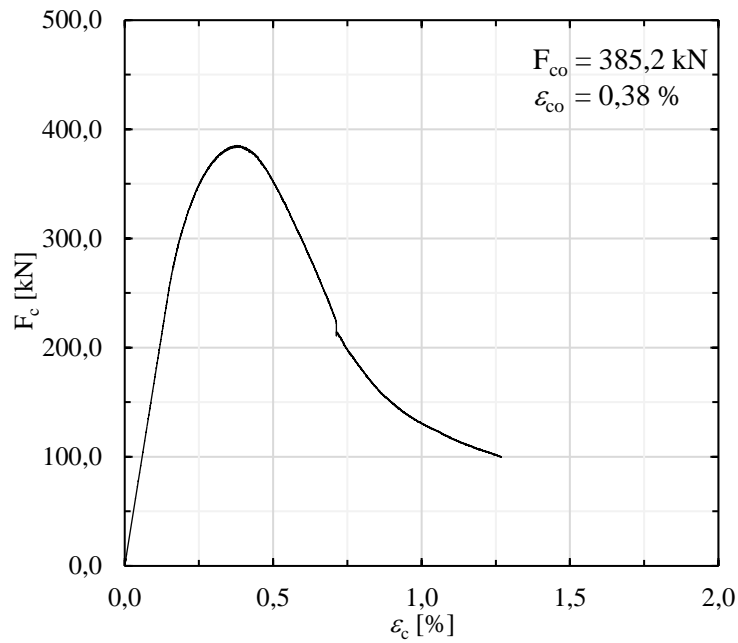


Figura 5.3 - Diagrama força-deformação do modelo CNR, da série de referência

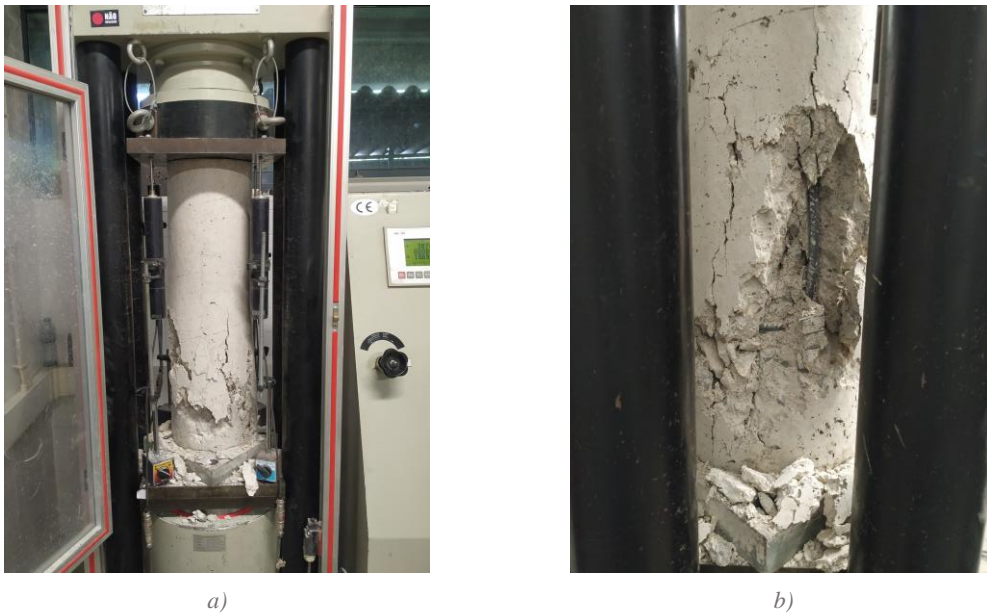


Figura 5.4 - Modo de rotura, modelo CNR: a) visão geral e b) pormenor das armaduras

5.2.3. Série CA

Os modelos desta série são compostos de betão armado e são reforçados com a malha têxtil de fibras de carbono *ARMO-mesh® L500*, fazendo-se variar o número de camadas. Para cada variação foram reforçados dois pilares.

No modo de rotura destes modelos destacam-se três fenómenos. Inicialmente vão-se desenvolvendo pequenas fendas verticais ao longo da argamassa. De seguida evidencia-se um

empolamento da argamassa, normalmente a meia altura, resultado da deformação transversal do betão. Por último, dá-se a rotura do modelo como consequência da rotura das fibras. Este foi um padrão observado em todos os ensaios desta série. A rotura deste material é lenta e progressiva, e uma vez atingida a tensão de compressão máxima o material suporta ainda grandes deformações até perder toda a capacidade resistente.

Modelos CA₁

Foram ensaiados dois modelos CA₁, reforçados com uma camada de malha têxtil de fibras de carbono. As forças de compressão máximas no betão confinado e respectivas extensões axiais registadas foram {694,5 kN; 0,92 %} e {671,4 kN; 0,89 %} para os modelos CA₁-01 e CA₁-02, respetivamente. Na Figura 5.5 apresentam-se as curvas de força-deformação de ambos os modelos CA₁. A força máxima de compressão dos modelos da presente série registou um aumento médio de 1,8 vezes em relação ao modelo de referência CNR.

Ambos os modelos tiveram um comportamento semelhante e, como se pode observar na Figura 5.5, numa primeira fase há uma perda de rigidez, seguida de um incremento considerável da resistência à compressão do pilar até à força de compressão máxima.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 é possível ver que os modelos CA₁ tiveram uma rotura semelhante, a meia altura. Destaca-se também o empolamento da malha têxtil e a rotura das fibras em ambos os modelos.

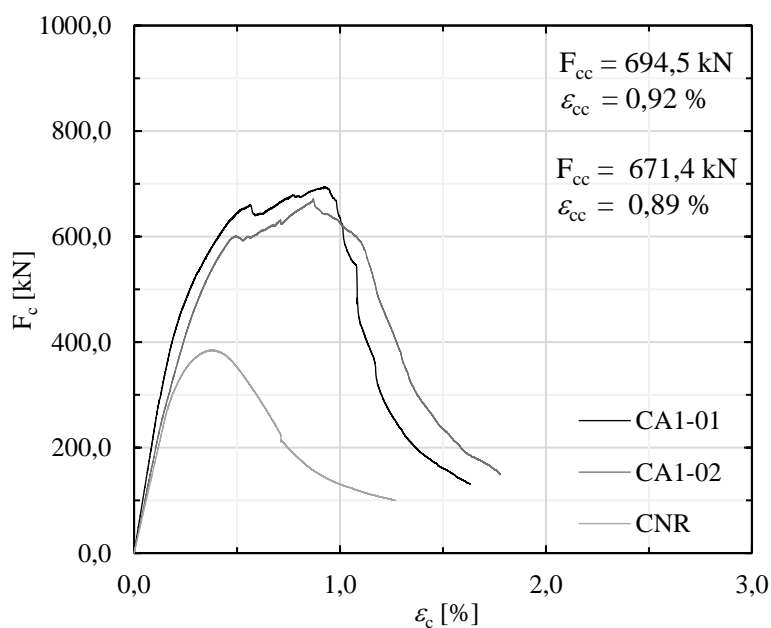


Figura 5.5 - Diagrama força-deformação dos modelos CA₁



a)



b)

Figura 5.6 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA₁ - 01



a)



b)

Figura 5.7 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA₁ - 02

Modelos CA₂

Foram ensaiados dois modelos CA₂ reforçados com duas camadas de malha têxtil de fibras de carbono. Nestes ensaios foram registadas forças de compressão máxima no betão confinado e respetivas extensões axiais de {854,9 kN; 1,29 %} e {994,8 kN; 1,50 %} para os modelos CA₂-01 e CA₂-02, respetivamente. As curvas força-deformação de ambos os modelos são apresentadas na Figura 5.8. Face ao modelo de referência CNR foi registado um aumento médio de 2,4 vezes na força de compressão máxima dos modelos CA₂.

Como se verifica na Figura 5.8, ambos os modelos desta série tiveram um comportamento relativamente semelhante, com uma curva caracterizada por três fases distintas. Nas Figuras 5.9 e 5.10 são apresentados os modos de rotura dos modelos CA₂. Através destas figuras pode-se ver que foi possível atingir a rotura das fibras em ambos os modelos.

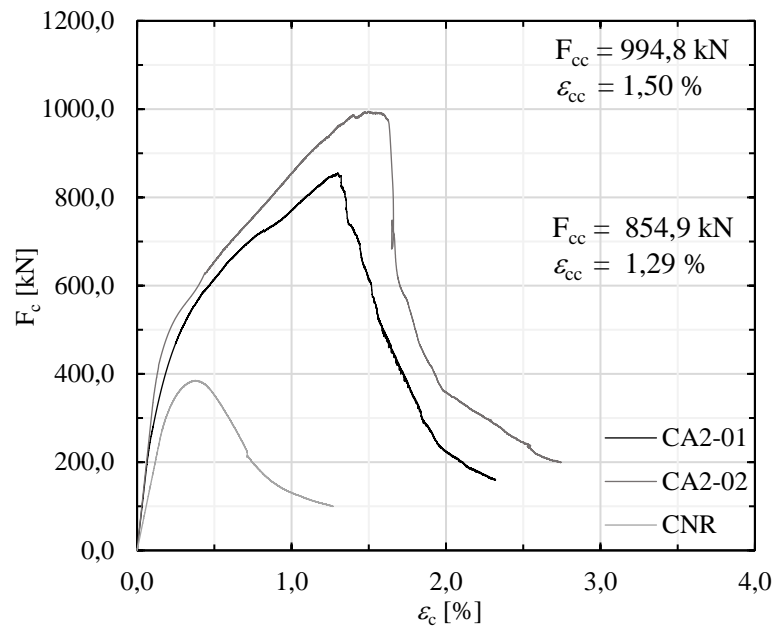


Figura 5.8 - Diagrama força-deformação dos modelos CA₂



Figura 5.9 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA₂ - 01



Figura 5.10 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA₂ - 02

Modelos CA₃

Por último, na série CA foram também ensaiados dois modelos CA₃, reforçados com três camadas de malha têxtil de fibras de carbono. Estes modelos registaram uma força de compressão máxima e respetiva extensão axial de {953,1 kN; 1,35 %} e {1218,1 kN; 1,82 %} para os modelos CA₃-01 e CA₃-02, respetivamente. Nestes modelos não houve uma semelhança tão evidente como nos pares anteriores, em particular no que se refere aos máximos registados. Na Figura 5.11 apresentam-se as curvas força-deformação de ambos os modelos CA₃.

Face ao modelo de referência CNR, os modelos CA₃ registaram um aumento médio de 2,8 vezes na força de compressão máxima.

Também nos modos de rotura houve algumas diferenças. O modelo CA₃-01 teve uma rotura a meia altura com uma fenda vertical a toda a altura ao contrário do modelo CA₃-02 no qual se evidencia uma rotura horizontal na parte superior do modelo. Ambos os modos de rotura podem ser observados nas Figuras 5.12 e 5.13.

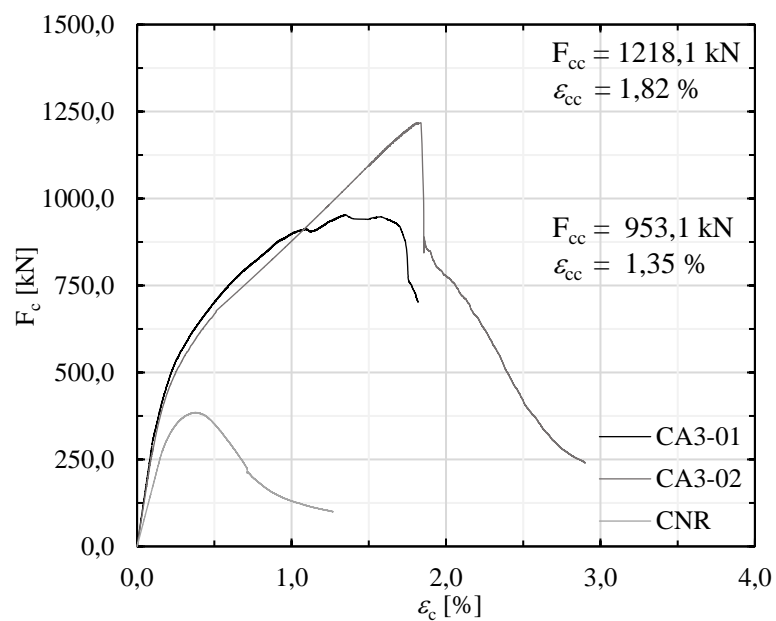


Figura 5.11 - Diagrama força-deformação dos modelos CA3



a)



b)

Figura 5.12 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA3 - 01

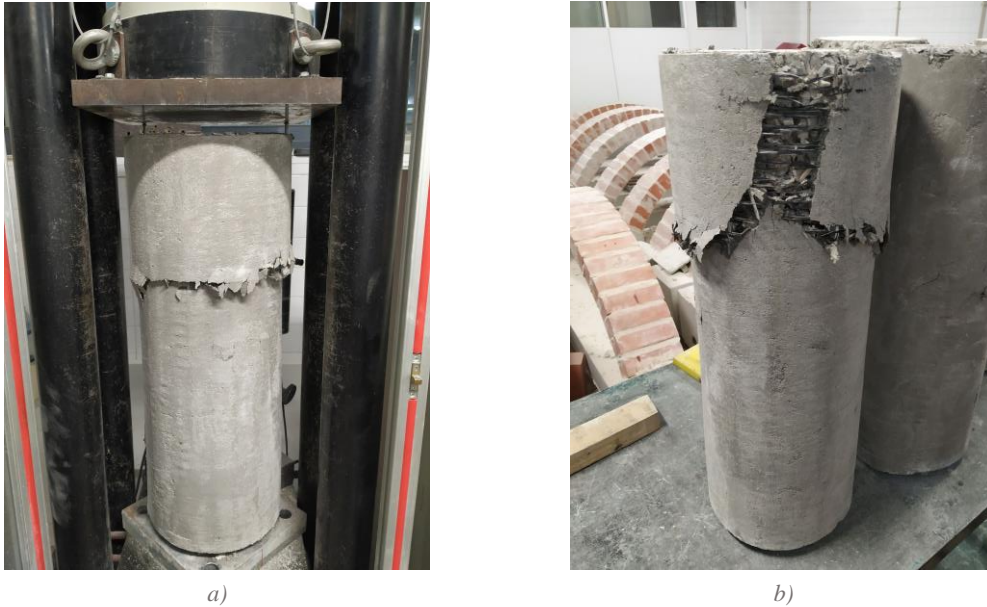


Figura 5.13 - Pormenores do modo de rotura do modelo CA₃ - 02

5.2.4. Série SA

Modelo SA₂

Nesta série apenas foi reforçado um modelo com duas camadas de *ARMO-mesh*[®] L500. Neste ensaio foi registada uma força de compressão máxima e respetiva extensão axial de {710,4 kN; 0,98 %} e a curva força-deformação deste modelo é apresentada na Figura 5.14. O valor máxima da força de compressão deste modelo registou uma melhoria de 2,2 vezes em relação ao modelo de referência SNR. Esta série teve um modo de rotura semelhante ao observado na série CA, no qual se destacam três fenómenos. Inicialmente começam a desenvolver-se pequenas fendas verticais em todo o pilar. De seguida dá-se o empolamento da argamassa a meia altura, em consequência da deformação transversal do betão (Figura 5.15 - a), e por último a rotura das fibras, como se pode observar na Figura 5.15 - b.

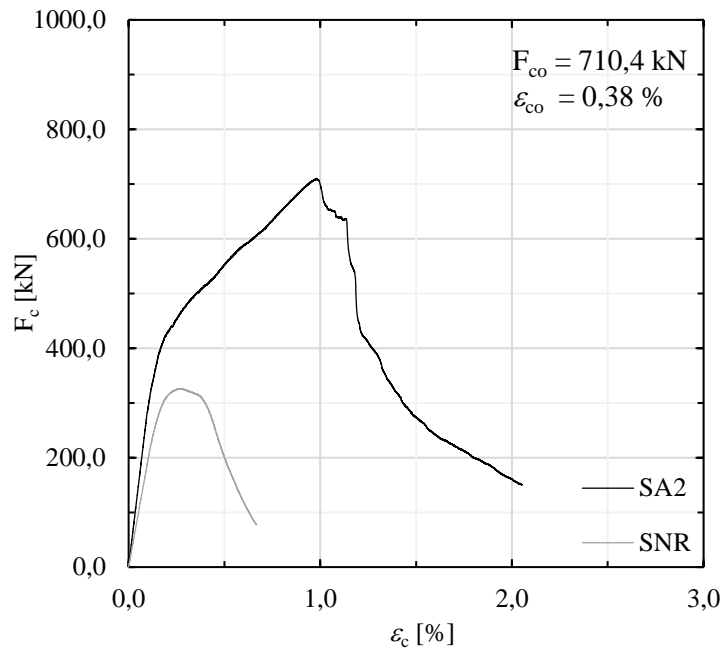


Figura 5.14 - Diagrama força-deformação do modelo SA2



Figura 5.15 - Pormenores do modo de rotura do modelo SA2

5.2.5. Série CC

Os modelos desta série são de betão armado e são reforçados com a manta de fibras de carbono *C-Sheet 240*. Foram reforçados apenas três pilares, fazendo-se variar o número de camadas. Durante os ensaios, momentos antes da rotura de cada modelo, foram ouvidos ruídos nas fibras explicados pelo constrangimento que o confinamento causa à expansão do betão. Foi registada uma rotura do tipo explosiva em todos os modelos desta série. Estruturas fortemente reforçadas com CFRP são caracterizadas por apresentarem uma rotura frágil.

Em seguida, serão apresentados os resultados e as roturas de cada modelo. De notar que, por engano, os extensómetros foram colocados em posições que não as mais adequadas, sendo previsível não ocorrerem aí as extensões mais elevadas. Acrescenta-se ainda que, tendo em conta os modos de rotura observados, acredita-se que esta questão não tenha influenciado determinadamente os resultados nem, tão pouco, as conclusões do trabalho.

Modelo CC₁

Foi reforçado apenas um pilar com uma camada de tecidos de fibra de carbono que registou {973,1 kN; 1,86 %; 1,34 %} de força de rotura à compressão, extensão axial e extensão lateral, respetivamente. Na Figura 5.16 mostra-se a curva força-deformação do modelo CC₁. A rotura deste modelo ocorreu a meia altura, como se mostra na Figura 5.17. Em comparação com a força de compressão máxima do betão não confinado registou-se um valor de 2,5 vezes superior.

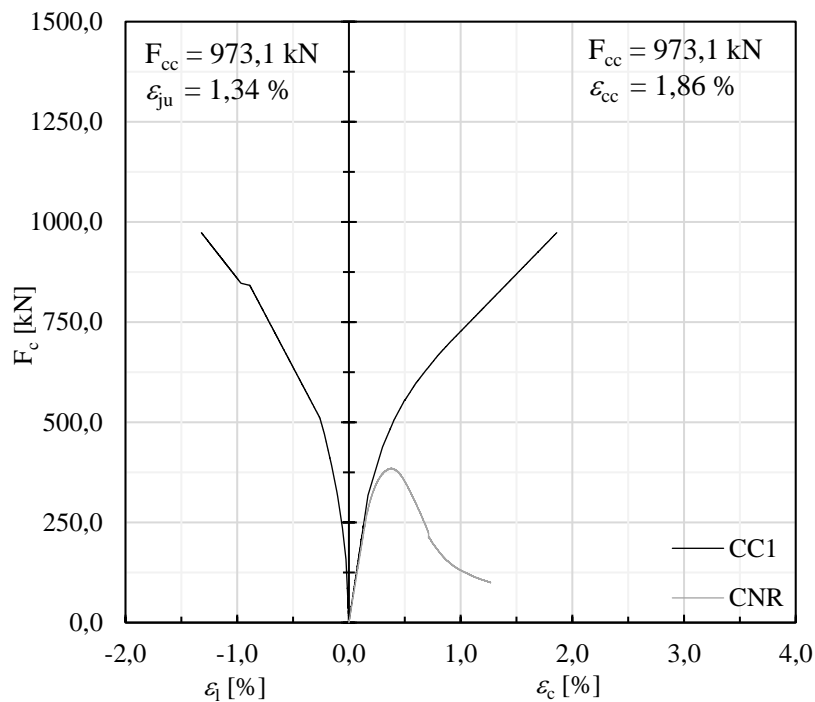


Figura 5.16 - Diagrama força-deformação do modelo CC₁



Figura 5.17 - Modo de rotura do modelo CC₁

Modelo CC₂

Com duas camadas de CFRP foi igualmente reforçado apenas um pilar. Neste ensaio registou-se {1561,6 kN MPa; 2,81 %; 1,53 %} de tensão de rotura à compressão, extensão axial e extensão lateral, respetivamente. A curva força-deformação deste modelo é apresentada na Figura 5.18. Este modelo teve uma rotura na metade superior, como é possível comprovar na Figura 5.19. Neste ensaio registou-se um aumento de 4,0 vezes relativamente à força de compressão máxima do betão não confinado.

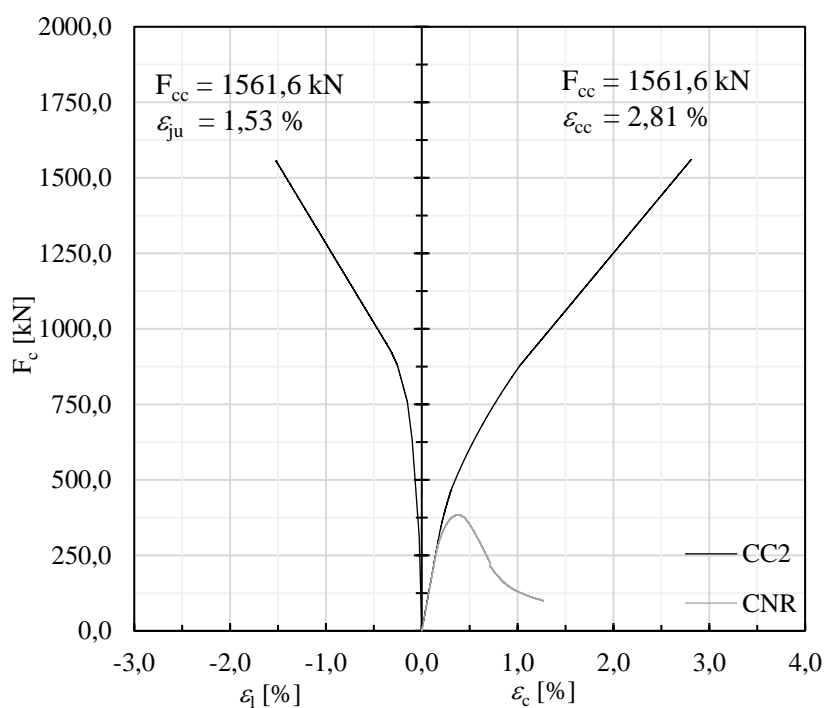


Figura 5.18 - Diagrama força-deformação do modelo CC₂



Figura 5.19 - Modo de rotura do modelo CC₂

Modelo CC₃

Por último, com três camadas de CFRP foi igualmente reforçado apenas um pilar, que registou {1678,6 kN; 3,35 %; 1,29 %} de tensão de rotura à compressão, extensão axial e extensão lateral, respetivamente. Neste ensaio houve um problema com os extensómetros 1 e 3 que não registaram valores, e como tal admite-se que a curva apresentada não corresponda à extensão de rotura do modelo. A curva força-deformação do modelo CC₃ é apresentada na Figura 5.20. A rotura deste modelo deu-se a meia altura, como é possível observar na Figura 5.21.

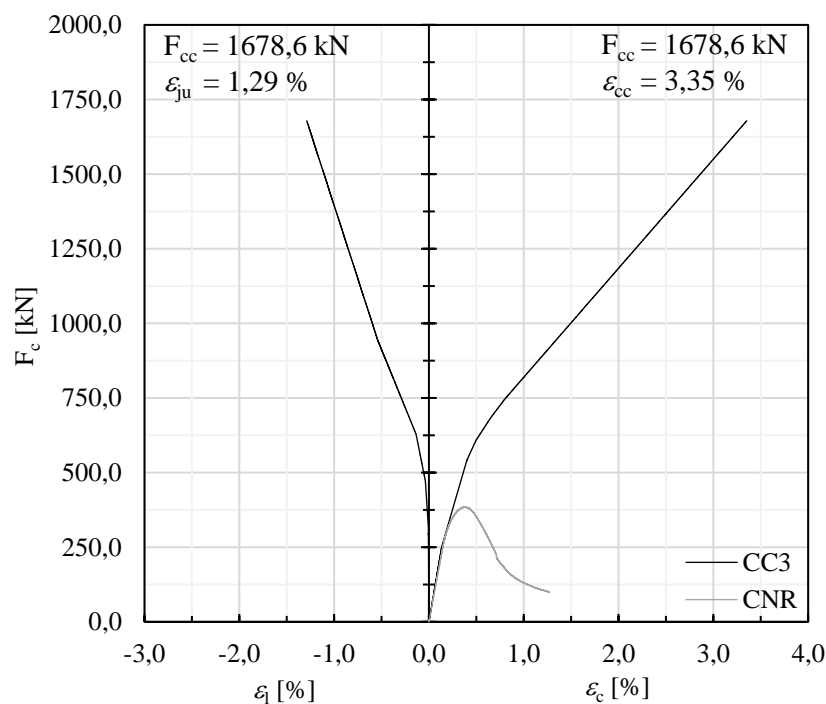


Figura 5.20 - Diagrama força-deformação do modelo CC₃



Figura 5.21 - Modo de rotura do modelo CC₃

Capítulo 6. Análise de resultados

6.1. Introdução

Neste capítulo é feita uma análise dos resultados obtidos na campanha experimental, em duas fases. Numa primeira fase, são analisados os parâmetros que caracterizam o desempenho do confinamento do betão. Numa segunda fase, comparam-se os resultados obtidos através do reforço de CFRCM com os que seriam possíveis obter com as equações teóricas apresentadas no Capítulo 3.

6.2. Análise dos parâmetros dos ensaios

Para a caracterização do desempenho do betão confinado foram analisados os seguintes parâmetros da resposta: força de compressão máxima e respetiva extensão axial, curvas força-extensão axiais e extensão do CFRP. Esta análise teve como principal foco a influência dos sistemas de reforço (CFRP e CFRCM) no comportamento dos pilares de betão sujeitos a compressão. Para tal confrontaram-se os resultados das séries de referência com as demais. Adicionalmente, foram comparados os diferentes sistemas de reforço.

Na Tabela 6.1 listam-se os resultados da força de compressão máxima no betão não confinado (F_{co}), da força de compressão máxima no betão confinado (F_{cc}), das extensões axiais correspondentes (ε_{co} , ε_{cc}) e da extensão lateral (ε_{ju}). Adicionalmente, listam-se os valores médios de cada grandeza, por série de modelos.

Na Figura 6.1 apresentam-se um gráfico de barras com os valores médios de cada série de ensaios. As séries estão diferenciadas por cores. A cinzento claro representam-se as séries de referência (SNR e CNR), a cinzento intermédio as séries reforçadas por CFRCM (SA e CA) e a cinzento escuro a série reforçada com CFRP (CC).

Tabela 6.1 - Resultados experimentais: força de compressão máxima, extensão axial e extensão lateral

Série	Modelo	F_{co} (kN)	F_{cc} (kN)	F_{cc}^{med} (kN)	ε_{co} (%)	ε_{cc} (%)	ε_{cc}^{med} (%)	ε_{ju} (%)
SNR	-	325,9	-	-	0,26	-	-	-
SA	SA ₂	-	710,4	710,4	-	0,98	0,98	-
CNR	-	385,2	-	-	0,38	-	-	-
CA	CA ₁ - 01	-	694,5	683,0	-	0,92	0,91	-
	CA ₁ - 02	-	671,4		-	0,89		-
	CA ₂ - 01	-	854,9	924,9	-	1,30	1,40	-
	CA ₂ - 02	-	994,8		-	1,50		-
	CA ₃ - 01	-	953,1	1085,6	-	1,35	1,59	-
	CA ₃ - 02	-	1218,1		-	1,82		-
CC	CC ₁	-	973,1	973,1	-	1,86	1,86	1,34
	CC ₂	-	1516,6	1516,6	-	2,81	2,81	1,53
	CC ₃	-	1678,6	1678,6	-	3,35	3,35	1,29

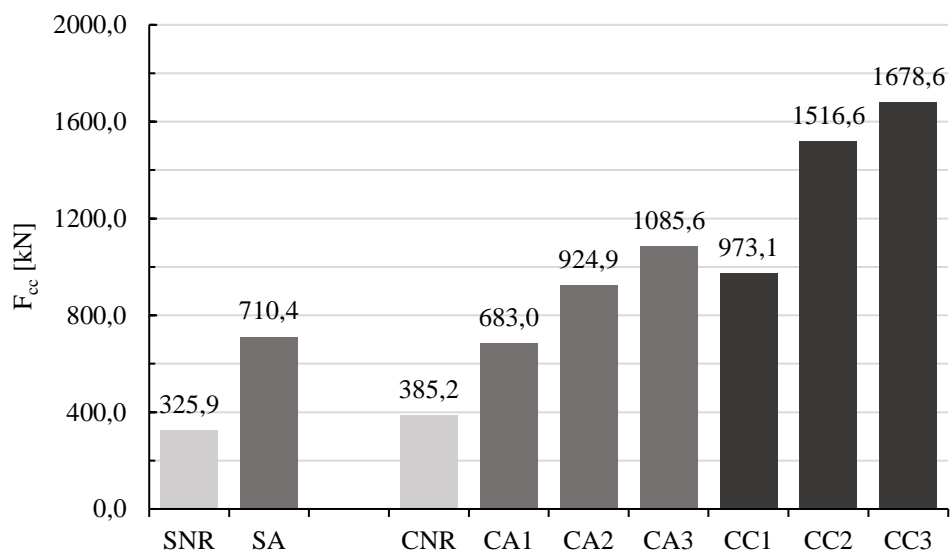


Figura 6.1 - Forças de compressão máxima (valores médios)

Na Figura 6.2 apresentam-se de igual forma os valores médios da extensão axial correspondente à força de compressão máxima de cada série. Através deste gráfico, comprova-se que todos os modelos da série CC registaram uma extensão axial superior aos modelos da série CA.

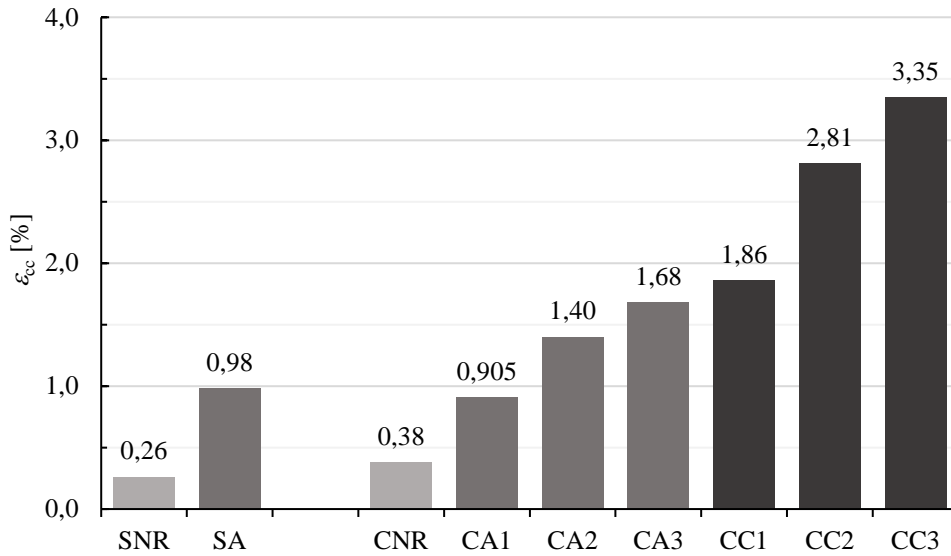


Figura 6.2 - Extensões axiais de compressão (valores médios)

Com base nos resultados listados na Tabela 6.1, gerou-se o gráfico da Figura 6.3 para uma visualização mais intuitiva dos mesmos. As séries CA₂ e CA₃ evidenciam uma dispersão dos resultados, tanto ao nível da resistência à rotura como da extensão axial, facto esse que poderá ser justificado por imperfeições nos modelos ou irregularidades na amassadura do betão.

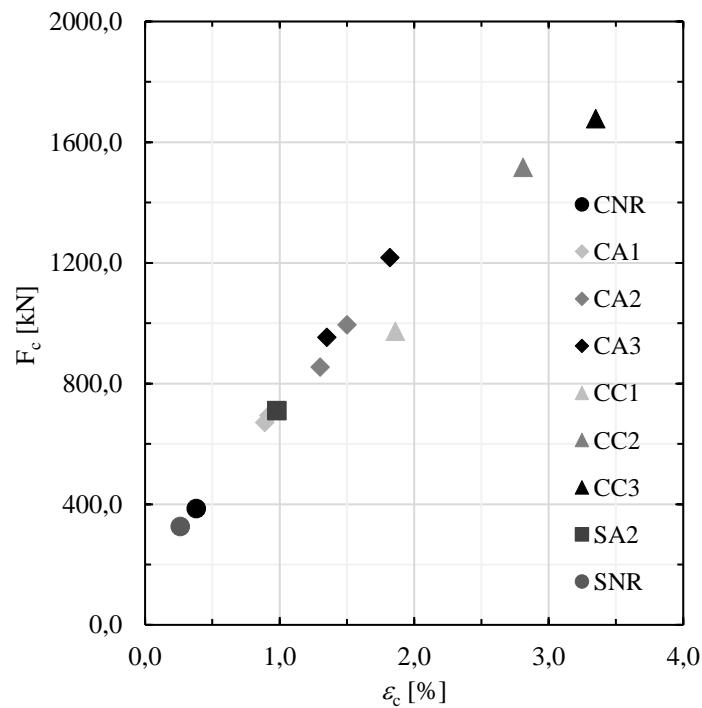


Figura 6.3 - Forças de compressão máximas e respetivas extensões axiais

Influência das armaduras

Na Tabela 6.2 apresentam-se o aumento da força de compressão máxima e a respetiva extensão axial nos modelos com armadura (CNR e CA₂) relativamente aos mesmos modelos sem armadura (SNR e SA₂). Os valores apresentados da força e extensão da série CA₂ são uma média dos dois modelos dessa série.

Tabela 6.2 - Influência das armaduras de aço no confinamento do betão

Série	F _{cc} (kN)	F _{cc}	ε_{cc} (%)	ε_{cc}
		F _{co}		ε_{co}
SNR	325,9	1,00	0,32	1,00
CNR	385,2	1,18	0,38	1,19
SA ₂	710,40	1,00	1,05	1,00
CA ₂	924,85	1,30	1,49	1,42

Analisando os dados da Tabela 6.2, podemos observar que, a presença da armadura contribui para um aumento da força de compressão máxima de 18% e 30%, para os modelos CNR e CA₂, respetivamente. O mesmo se verifica para a extensão correspondente à força máxima, na qual se verificou um aumento de 19% e 42%, para os modelos CNR e CA₂, respetivamente.

Na Figura 6.4 apresentam-se as curvas de força-deformação das séries de referência e na Figura 6.5 as mesmas curvas referentes às séries CA₂ e SA₂. A curva referente à série CA₂ é uma média das curvas dos dois modelos desta série.

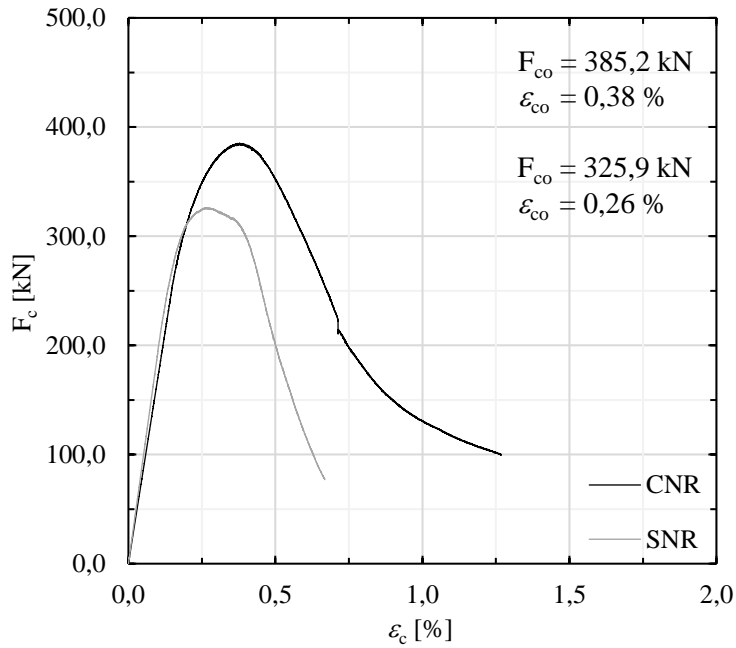


Figura 6.4 - Curvas força-deformação das séries de referência SNR e CNR

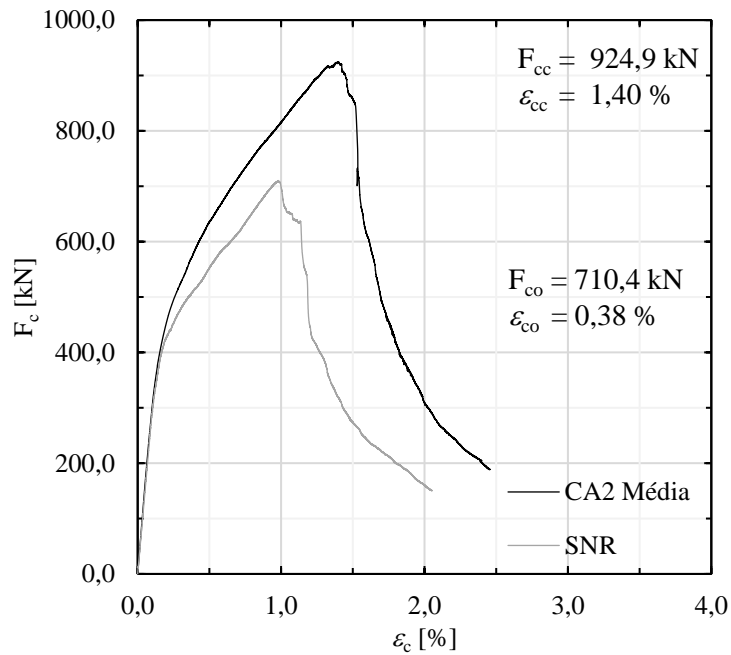


Figura 6.5 - Curvas força-deformação das séries CA2 e SA2

Com a presença de armaduras registou-se um aumento maior entre os modelos CA₂ e SA₂ em relação ao aumento registado entre os modelos CNR e SNR. Este fenómeno poderá ser justificado pelo facto do betão estar confinado e as armaduras não terem tanta facilidade em encurvar. Pode-se verificar em ambos os gráficos que a rigidez inicial do betão é praticamente a mesma para todos os modelos. Observa-se também que, independentemente do reforço da armadura na série CA₂, o andamento da curva após o pico é bastante similar ao da curva da série SA₂.

Influência dos sistemas de reforço

Na Tabela 6.3 apresenta-se uma comparação entre os aumentos de força de compressão máxima e respetiva extensão axial conseguidos com os dois tipos de reforço utilizados. Os valores apresentados da força e extensão das séries CA são uma média dos dois modelos de cada série de camadas. É de salientar que todos os dados que se apresentam na Tabela 6.3 e subseqüentes gráficos têm contabilizado o efeito das armaduras de aço.

Tabela 6.3 - Influência do tipo de reforço nos valores da força e extensão do betão confinado

Série	F_{cc} (kN)	F_{cc}	ε_{cc}	ε_{cc}
		F_{co}	(%)	ε_{co}
CNR	385,2	1,00	0,38	1,00
CA ₁	683,0	1,77	0,91	2,39
CC ₁	973,1	2,40	1,92	5,05
CA ₂	924,9	2,82	1,49	3,92
CC ₂	1516,6	3,94	2,86	7,53
CA ₃	1085,6	2,82	1,68	4,42
CC ₃	1678,6	4,36	3,44	9,05

Com base nos valores da Tabela 6.3, é possível comparar a resistência dos modelos de betão armado, reforçados com uma, duas e três camadas de CFRP e de CFRCM. Com ambos os reforços foi possível aumentar a força de compressão máxima do betão e a correspondente extensão axial.

Com o reforço de CFRCM conseguiram-se ganhos de 1,77, 2,39 e 2,81 vezes a resistência máxima do betão não confinado, com uma, duas e três camadas, respetivamente. Ao nível da extensão axial, registaram-se melhorias de 2,39, 3,92 e 4,42 vezes relativamente à extensão no betão não confinado.

Com o reforço de CFRP foi possível aumentar a força de compressão no betão em 2,52, 4,04 e 4,34 vezes, com uma, duas e três camadas respetivamente. Ao nível da extensão axial correspondente à força de rotura do betão conseguiram-se aumentos de 5,05, 7,53 e 9,05 vezes comparativamente à extensão no betão não confinado.

Embora o reforço de CFRP apresente ganhos superiores, o reforço de CFRCM apresenta uma resposta pós pico surpreendente, uma vez que suporta grandes deformações até o pilar perder toda a capacidade resistente. É possível observar este facto através das Figuras 6.6, 6.7 e 6.8, onde se comparam diretamente os dois sistemas de reforço.

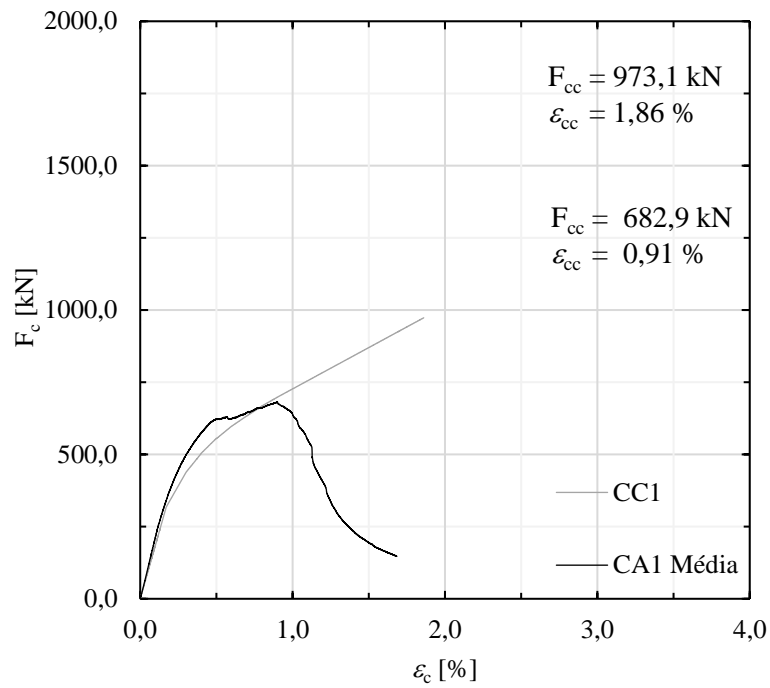


Figura 6.6 - Curvas força-deformação axial das séries CA1 e CC1

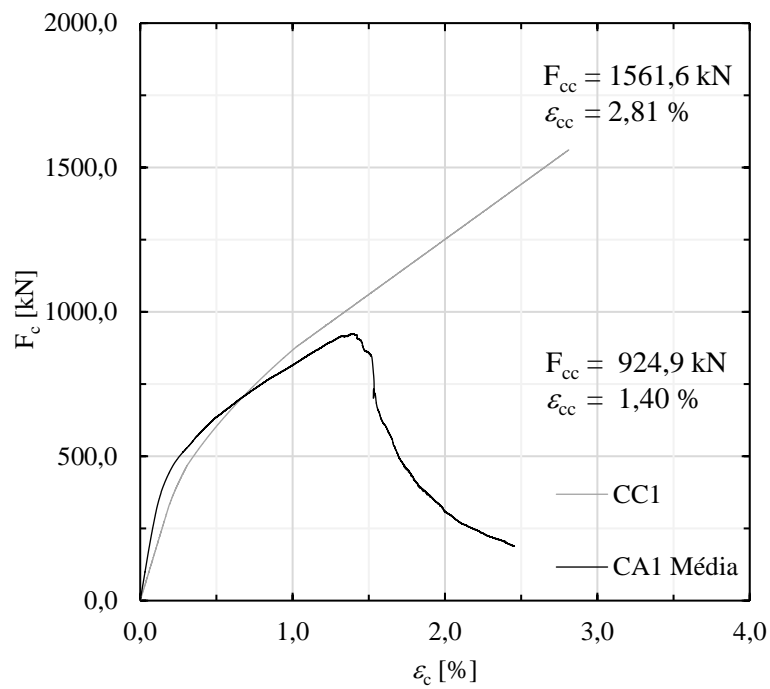


Figura 6.7 - Curvas força-deformação axial das séries CA2 e CC2

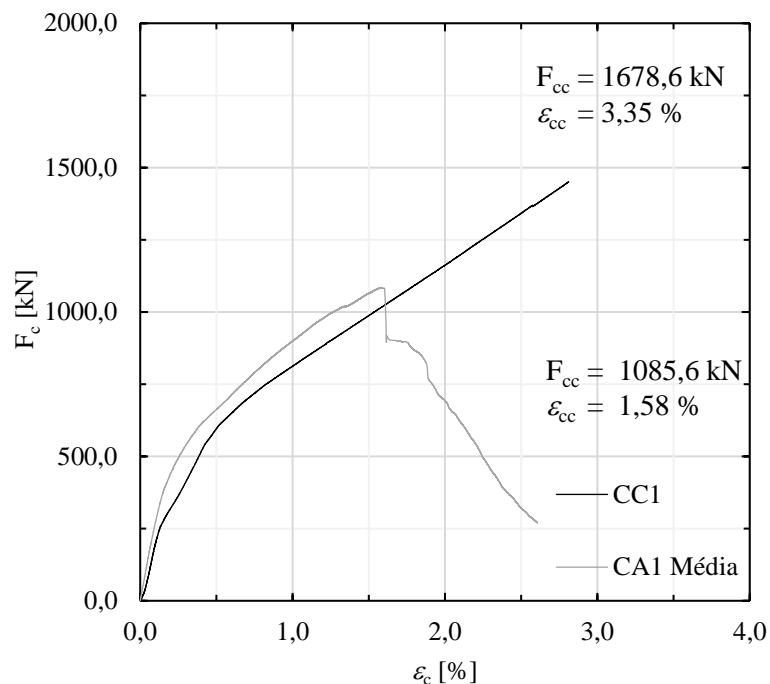


Figura 6.8 - Curvas força-deformação axial das séries CA3 e CC3

Contribuição das camadas

A capacidade resistente do betão confinado é função do número de camadas de confinamento, o que se confirmou nos resultados obtidos nas séries CA e CC. Nas Figuras 6.9 e 6.10 apresentam-se as curvas força-deformação das séries CA e CC, respetivamente. As curvas das séries CA dizem respeito aos valores médios dos dois modelos de cada série de camadas.

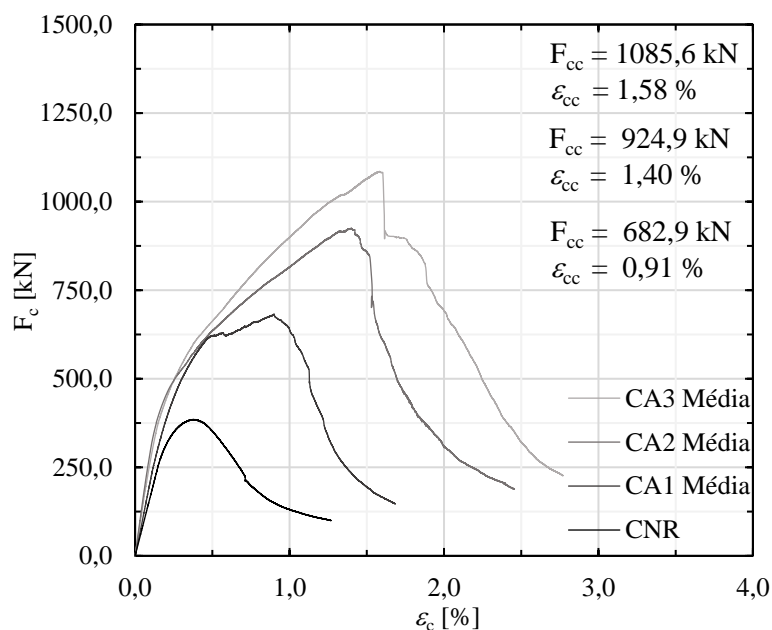


Figura 6.9 - Curvas força-deformação das séries CNR e CA

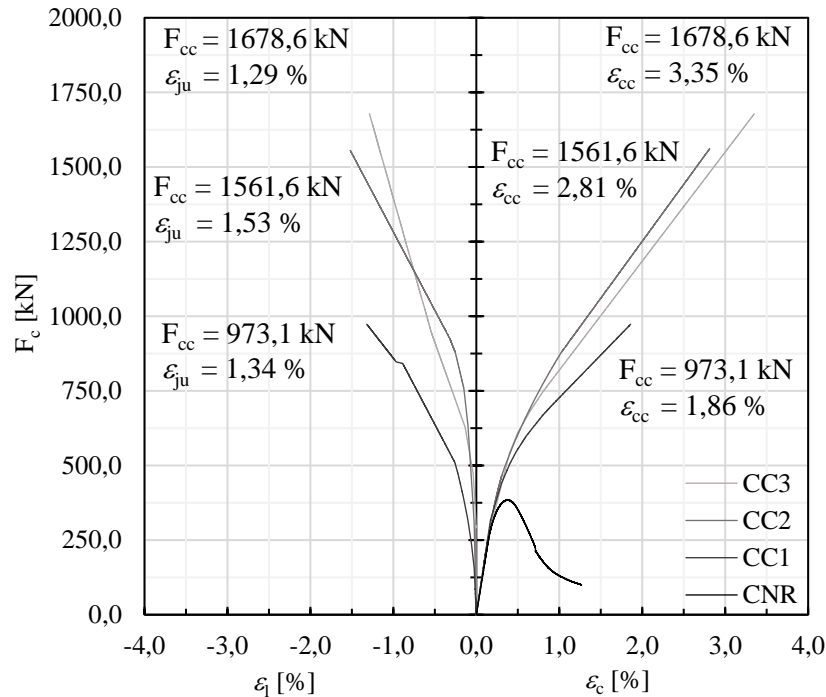


Figura 6.10 - Curvas força-deformação das séries CNR e CC

Como se pode observar na Figura 6.9, as curvas força-deformação dos modelos com diferentes camadas apresentam um certo padrão, apesar das diferenças registadas nos modelos de três camadas. Após o pico da força de compressão, ocorre uma fase de amolecimento, onde o pilar vai perdendo gradualmente a sua capacidade resistente. O padrão das curvas força-deformação dos modelos CA confirma o seu modo de rotura lento e progressivo.

Analisando a Figura 6.10, destaca-se o facto do modelo de CC₂ apresentar um rigidez final superior ao modelo CC₃. Observa-se ainda que entre o modelo CC₂ e o modelo CC₁ há uma melhoria considerável na força máxima. Essa melhoria já não é tão evidente entre o modelo CC₂ e CC₃.

É possível observar que ambos os reforços apresentam uma primeira fase elástica linear, e uma segunda fase linear distinta, com a excepção da série CA₁ que não tem a segunda fase bem definida.

6.3. Comparação entre os modelos teóricos e os resultados experimentais

Nesta secção são utilizadas as equações teóricas enunciadas no Capítulo 3 para a previsão da tensão máxima de compressão no betão confinado com CFRCM e da extensão axial correspondente. Posteriormente, compararam-se estes resultados com os que se obtiveram na campanha experimental.

Inicialmente, é necessário calcular a tensão lateral de confinamento para cada série de camadas, recorrendo à expressão (3.34). Para os valores de resistência à tração f_t e da espessura t_f , foram utilizados os dados fornecidos pela ficha técnica do CFRCM (Tabela 4.15). Na Tabela 6.4 apresentam-se os valores resultantes do cálculo da tensão lateral de confinamento dos modelos CA.

Tabela 6.4 - Valores de da tensão lateral de confinamento dos modelos CA

Modelo	f_j (MPa)	t (mm)	D (mm)	n	f_{lu} (MPa)
CA ₁	4300	0,105	210	1	4,30
CA ₂			215	2	8,40
CA ₃			220	3	12,31

Na Tabela 6.5 resumem-se os valores da tensão de compressão máxima no betão não confinado (f_{co}) e da extensão axial correspondente (ε_{co}), da tensão lateral de confinamento (f_{lu}) e por último da tensão de compressão máxima no betão confinado com CFRCM (f_{cc}) e a respetiva extensão axial (ε_{cc}).

Tabela 6.5 - Tensões e extensões dos modelos CA

Modelo	f_{co} (MPa)	ε_{co} (%)	f_{lu} (MPa)	f_{cc} (MPa)	ε_{cc} (%)
CA ₁	10,40	0,0026	4,30	14,61	0,90
CA ₂	10,40	0,0026	8,40	20,37	1,40
CA ₃	10,40	0,0026	12,31	23,45	1,58

Aos valores de f_{cc} foi subtraída a contribuição das armaduras do aço à compressão, para posteriormente comparar com as tensões calculadas através das equações teóricas.

Nas Tabelas 6.6 e 6.7 apresentam-se respetivamente os valores da tensão máxima no betão confinado e da correspondente extensão axial, calculados através das equações teóricas enunciadas na Tabela 3.1. Nas mesmas tabelas é feita uma comparação entre os valores calculados (teóricos) e os obtidos experimentalmente.

Tabela 6.6 - Comparação entre a tensão de confinamento máxima teórica e experimental

Modelo teórico	$f_{cc}^{teor.}$ (MPa)			$\frac{f_{cc}^{teor.}}{f_{cc}^{exp.}}$			Média	Desvio Padrão
	CA ₁	CA ₂	CA ₃	CA ₁	CA ₂	CA ₃		
Triantafillou <i>et al.</i> (2006)	18,57	26,36	33,80	1,27	1,29	1,44	1,34	0,08
Di Ludovico <i>et al.</i> (2010)	21,94	30,78	38,61	1,50	1,51	1,65	1,55	0,07
De Caso y Bassalo <i>et al.</i> (2012)	25,45	35,69	44,42	1,74	1,75	1,89	1,80	0,07
ACI Committee 549 (2013)	16,35	22,30	28,26	1,12	1,09	1,20	1,14	0,05
Ombres (2014)	20,55	30,70	40,85	1,41	1,51	1,74	1,55	0,14
Ombres e Mazzuca (2016)	14,88	17,74	20,13	1,02	0,87	0,86	0,92	0,07

Tabela 6.7 - Comparação entre a extensão axial teórica e experimental

Modelo teórico	$\varepsilon_{cc}^{teor.}$ (%)			$\frac{\varepsilon_{cc}^{teor.}}{\varepsilon_{cc}^{exp.}}$			Média	Desvio Padrão
	CA ₁	CA ₂	CA ₃	CA ₁	CA ₂	CA ₃		
Triantafillou <i>et al.</i> (2006)	2,16	3,98	5,71	2,40	2,84	3,61	2,95	0,50
Di Ludovico <i>et al.</i> (2010)	1,11	1,76	2,34	1,23	1,26	1,48	1,32	0,11
De Caso y Bassalo <i>et al.</i> (2012)	2,58	4,16	5,50	2,87	2,97	3,48	3,11	0,27
ACI Committee 549 (2013)	1,54	2,68	3,83	1,71	1,92	2,42	2,02	0,30
Ombres (2014)	2,55	3,34	3,89	2,84	2,38	2,46	2,56	0,20
Ombres e Mazzuca (2016)	0,37	0,59	0,90	0,41	0,42	0,57	0,47	0,07

Analisando a Tabela 6.6, os modelos que melhor estimam a tensão máxima do betão confinado com CFRCC são os modelos da norma ACI 549 [41] e de Ombres e Mazzuca [53]. De todos os modelos apresentados, o de Ombres e Mazzuca [53] que apresenta resultados conservativos.

Para as extensões correspondentes à tensão de compressão máxima (Tabela 6.7), regista-se uma dispersão dos resultados maior, sendo o modelo que mais se aproxima das extensões registadas o modelo de Di Ludovico *et al.* (2010) [55].

Capítulo 7. Considerações finais

7.1. Conclusões

O estudo realizado nesta dissertação teve como principal objetivo a caracterização de um sistema de reforço relativamente novo, o CFRCM, no confinamento de pilares circulares de betão. Para isso realizaram-se ensaios de compressão uniaxial em modelos reforçados com CFRP e CFRCM. Todos os modelos foram reforçados em toda a altura e fez-se variar o número de camadas. Os dois sistemas foram aplicados com as fibras orientadas segundo a direção perpendicular ao eixo dos pilares.

Através dos resultados obtidos, foi evidenciado que, ambos os modelos confinados com CFRP e CFRCM apresentam uma primeira fase elástica linear e uma segunda fase distinta aproximadamente linear. Este padrão não foi observado nos modelos da série CA₁, em que o andamento da curva tensão-deformação não foi tão linear na segunda parte do gráfico. O CFRCM tem ainda uma terceira fase de amolecimento, na qual perde a capacidade resistente lentamente.

Em comparação com os modelos não reforçados, foi registado um aumento da capacidade resistente dos pilares ao nível da tensão e da extensão axiais, com ambos os sistemas de reforço. Como era expectável, este aumento variou com o número de camadas e com o tipo de encamisamento. O aumento mais evidente entre camadas registou-se no modelo CC₂, em relação ao modelo CC₁.

Foram conseguidos maiores ganhos na tensão máxima de compressão e na extensão axial correspondente nos modelos reforçados com CFRP. Contudo, este material apresenta uma gramagem superior (segundo as fichas técnicas do fabricante), pelo que não se pode fazer uma comparação direta dos resultados. Alerta-se também para o facto dos modelos reforçados com CFRP apresentarem uma rotura explosiva, evidenciando um comportamento frágil, o que não se verificou nos ensaios dos modelos reforçados com CFRCM que, embora tenham ganhos percentuais menores, apresentam uma rotura lenta e progressiva.

Por último, utilizaram-se expressões teóricas propostas por alguns autores para o cálculo da tensão de compressão máxima e da extensão axial dos modelos confinados com CFRCM. A maioria destas expressões sobrestima os valores de tensão de compressão máxima do betão confinado e da correspondente extensão axial.

Com este trabalho, verificou-se que o reforço de pilares de betão com CFRCM é uma opção viável. Este material apresenta vantagens, das quais se destacam o subtrato a reforçar não ter de estar necessariamente regularizado, uma mão de obra menos especializada (em relação ao CFRP) e um modo de rotura lento e progressivo.

7.2. Trabalhos futuros

Uma vez que este estudo faz parte de uma dissertação de mestrado, o número de ensaios realizados foi limitado. É, então, necessário aprofundar o conhecimento do confinamento de pilares com FRCM em estudos futuros. Já que neste trabalho foi apenas estudada a variação do número de camadas de CFRCM e a constituição do betão (armado e não armado), propõem-se para estudos futuros: utilização de diferentes tipos de malha, adoção de secções retangulares ou circulares com diferentes raios e consideração diferentes solicitações (ensaio de cargas dinâmicas aplicadas de forma cíclica e combinação de esforço axial com flexão).

Quanto ao tipo de malha, sugere-se a utilização de uma malha têxtil de fibras de carbono com resistência superior à utilizada neste estudo e uma malha de fibra de vidro.

É igualmente importante a elaboração de modelos numéricos, calibrados a partir de um maior número de resultados experimentais, de maneira a compreender melhor o funcionamento deste material como sistema de reforço de pilares de betão.

Referências bibliográficas

- [1] Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas, “Resistência e vulnerabilidade sísmica dos edifícios”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 22 Abril 2005. [Online]. Disponível: <http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/vulnerabilidade.html>. [Acedido em 16 Janeiro 2020].
- [2] L. V. D. Einde, L. Zhao e F. Seible, “Use of FRP composites in civil structural applications”, *Construction and Building Materials*, nº 17, p. 389–403, 2003.
- [3] S. J. Phillips, “Plastic: MHOF (Monsanto House of the Future)”, em *Cold War Hothouses*, Nova York, Princeton Architectural Press, 2004, pp. 91-123.
- [4] T. Long, “June 12, 1957: Future Is Now in Monsanto's House”, 12 Junho 2009. [Online]. Disponível: <https://www.wired.com/2009/06/dayintech-0612/>. [Acedido em 15 Novembro 2019].
- [5] ACI Committee 440, “State-of-the-Art report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) reinforcement for concrete structures”, ACI 440 R-96, Farmington Hills, Michigan, 1996.
- [6] S. Black, “Carbon fiber: Key to cost-conscious rehab”, *Composites World*, 11 Janeiro 2014. [Online]. Disponível: <https://www.compositesworld.com/articles/carbon-fiber-key-to-cost-conscious-rehab>. [Acedido em 17 Março 2020].
- [7] “Carbon Fiber Composite”, Concrete Stabilization Technologies, Inc., [Online]. Disponível: <https://cststabilization.com/technologies/carbon-fiber-composite/>. [Acedido em 17 Março 2020].

- [8] J. Houlette, “Carbon Fiber Reinforcement of Masonry Wall for New 7 Eleven”, EVstudio, 27 Janeiro 2011. [Online]. Disponível: <https://evstudio.com/carbon-fiber-reinforcement-of-masonry-wall-for-new-7-eleven/>. [Acedido em 17 Março 2020].
- [9] fib Bulletin 14, “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, Fédération Internationale du Béton (fib), Task Group 9.3, Lausanne, 2001.
- [10] CNR-DT 200/2004, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures”, National Research Council, Roma, 2004.
- [11] W. Gerberich e W. Yang, “Interfacial and Nanoscale Fracture”, em *Comprehensive Structural Integrity*, vol. 8, Oxford, Elsevier, 2003, p. 596.
- [12] J. M. Mahishi e D. F. Adams, “Fracture behaviour of a single-fibre graphite/epoxy model composite containing a broken fibre or cracked matrix”, *Journal of materials science*, vol. 18, nº 2, pp. 447 - 456, 1983.
- [13] B. E. Gite e S. R. Margaj, “Carbon fiber as a recent material use in construction”, 2013. [Online]. Disponível: <https://www.engineeringcivil.com/carbon-fibre-as-a-recent-material-use-in-construction.html>. [Acedido em 11 Setembro 2019].
- [14] X. Huang, “Fabrication and properties of carbon fibers”, *Materials*, vol. 2, pp. 2369-2403, 2009.
- [15] P. Bhatt e A. Goel, “Carbon fibers: production, properties and potential use”, *Material Science Research India*, vol. 14, nº 1, pp. 52-57, 2017.
- [16] F. C. Campbell, *Structural Composite Materials*, 1ª ed., Ohio: ASM International, 2010, p. 612.
- [17] D. Hensher, *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications*, vol. 42, Amsterdam: Elsevier, 1993, p. 450.
- [18] T. Keller, *Use of fiber reinforced polymers in bridge construction*, Structural Engineering Documents (SED) No.7, Zurique: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2003, p. 131.

- [19] R. O. Ritchie e Y. Murakami, “Cyclic loading and fatigue”, em *Comprehensive structural integrity*, vol. 4, Oxford, Elsevier, 2003, p. 528.
- [20] B. F. M. d. Castro, “Estudo e caracterização mecânica de compósitos reforçados com fibras naturais”, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [21] L. C. Bank, *Composites for construction: structural design with FRP materials*, 1ª ed., Nova Jersey: Wiley, 2006, p. 560.
- [22] D. Azevedo, “Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP recomendações para dimensionamento”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, 2008.
- [23] L. Juvandes, “Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas”, em *1ª Jornadas de Materiais de Construção*, Porto, 2011.
- [24] M. Borba, “Comportamento da ligação CFRP/betão em estruturas de betão armado”, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2015.
- [25] A. A. Taib, R. Boukhili, S. Achiou, S. Gordon e H. Boukehili, “Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 26, nº 4, p. 226–236, 2006.
- [26] J. Dai, T. Ueda e Y. Sato, “Unifed analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pullout tests”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 4, nº 1, pp. 133 - 145, 2005.
- [27] A. R. Paula, “Influência da geometria das secções no confinamento de pilares de betão armado com compósitos de CFRP”, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.
- [28] C. Chastre, “Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão - potencialidades e limitações”, em *Congresso Latinoamericano REHABEND 2014*, Santander, Espanha, 2014.

- [29] S&P Clever Reinforcement Ibérica - Materiais de Construção, Lda., “S&P Portugal”, [Online]. Disponível: www.sp-reinforcement.pt/pt-PT/produtos/laminados/sp-c-laminate. [Acedido em 12 dezembro 2019].
- [30] L. Juvandes, “Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP”, Dissertação para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.
- [31] fib Bulletin 90, “Externally applied FRP reinforcement for concrete structures”, Fédération Internationale du Béton (fib), Task Group 5.1, Lausanne, 2019.
- [32] L. N. Koutas, Z. Tetta, D. A. Bournas e T. C. Triantafillou, “Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: State-of-the-art Review”, *Journal of composites for construction*, vol. 23, nº 1, p. 20, 2019.
- [33] T. Triantafillou, Textile fibre composites in civil engineering, Woodhead Publishing series in civil and structural engineering, 1ª ed., vol. 60, Duxford: Woodhead Publishing, 2016, p. 452.
- [34] K. Mayer. [Online]. Disponível: <https://www.karlmayer.com/en/news-and-media/news/building-for-the-future-with-karl-mayer/>. [Acedido em 05 Junho 2020].
- [35] Ardex, “Ardex Americas”, [Online]. Disponível: <https://www.ardexamericas.com/product/ardex-ardicoat-mesh>. [Acedido em 05 Junho 2020].
- [36] A. De Luca e G. Tumialan, “Structural rehabilitation”, *Structure magazine*, pp. 22 - 24, 2014.
- [37] S. Strong-Tie, “Strong-Tie newsroom”, [Online]. Disponível: <https://news.strongtie.com/2019/08/simpson-strong-tie-completes-seismic-testing-for-enhanced-code-listing-of-concrete-and-masonry-reinforcement-systems/>. [Acedido em 05 Junho 2020].
- [38] S.-R. Jeong, H.-H. Jeong, H. Park e D.-H. Kim, “Unidirectional fiber sheet for reinforcing concrete beams and methods of preparing the same”. Estados Unidos da América Patente US 6,238,761 B1, 29 Maio 2001.
- [39] S. C. Henriques, “Reforço de pilares de betão por encamisamento híbrido com mantas de FRP”, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2015.

- [40] V. Rodrigues, “Reforço sísmico de pilares de betão armado: análise e avaliação experimental”, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Faculdade de engenharia da universidade do Porto, 2005.
- [41] ACI Committee 549, “Guide to Design and Construction of Externally Bonded FRCM Systems for Repair”, Amrecian Concrete Institute (ACI) 549.4R-13, Farmington Hills, 2013.
- [42] J. Gonzalez-Libreros, M. A. Zanini, F. Faleschini e C. Pellegrino, “Confinement of low-strength concrete with fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) composites”, *Composites Part B*, vol. 177, p. 13, 2019.
- [43] J. Gonzalez-Libreros, C. Sabau, L. H. Sneed, G. Sas e C. Pellegrino, “Effect of confinement with FRCM composites on damaged concrete cylinders”, *Strain-Hardening Cement-Based Composites*, pp. 770 - 777, 2018.
- [44] J. B. Mander, M. J. N. Priestley e R. Park, “Theoretical stress-strain model for confined concrete”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 114, nº 8, pp. 1804 - 1826, 1988.
- [45] I. F. Ho, E. S. Lam, B. Wu e Y. Wang, “Monotonic behavior of reinforced concrete columns confined with high-performance ferrocement”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, nº 4, pp. 574-583, 2013.
- [46] J. B. Mander, M. J. N. Priestley e R. Park, “Observed stress-strain behavior of confined concrete”, *Journal of Structural Engineer*, vol. 114, nº 8, pp. 1827-1849, 1988.
- [47] S. Popovics, “A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete”, *Cemente and Concrete Research*, vol. 3, nº 5, pp. 583-599, 1973.
- [48] L. D. Lorenzis e R. Tepfers, “Comparative study of models on confinement of concrete cylinders with Fiber-Reinforced Polymer composites”, *Journal of Composites for Construction*, vol. 7, nº 3, 2003.
- [49] M. R. Spoelstra e G. Monti, “FRP confined concrete modelo”, *Journal of Composites for Construction*, vol. 3, nº 3, pp. 143-150, 1999.
- [50] M. Samaan, A. Mirmiran e M. Shahawy, “Model of concrete confined by fiber composites”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, nº 9, pp. 1025-1031, 1998.

- [51] R. M. Richard e B. J. Abbott, “Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 101, nº 4, pp. 511-515, 1975.
- [52] J.-H. Zhu, Z. Wang, M.-n. Su, T. Ueda e F. Xing, “C-FRCM jacket confinement for RC columns under impressed current cathodic protection”, *Journal of Composites for Construction*, vol. 24, nº 2, pp. 1-15, 2020.
- [53] L. Ombres e S. Mazzuca, “Confined concrete elements with cement-based composites: confinement effectiveness and prediction models”, *Journal of Composites for Construction*, vol. 21, nº 3, pp. 1-15, 2016.
- [54] C. Triantafillou, C. G. Papanicolaou, P. Zissimopoulos e T. Laourdekis, “Concrete confinement with Textile-Reinforced Mortar jackets”, *ACI Structural Journal*, vol. 103, nº 1, pp. 28-37, 2006.
- [55] Di Ludovico, M.; Prota, A.; Manfredi, G., “Structural upgrade using Basalt Fibers for concrete confinement”, *Journal of Composites for Construction*, vol. 14, nº 5, p. 541–552, 2010.
- [56] De Caso y Basalo, F. J.; Matta, F.; Nanni, A., “Fiber reinforced cement-based composite system for concrete confinement”, *Construction and Building Materials*, vol. 32, p. 55–65, 2012.
- [57] L. Ombres, “Concrete confinement with a cement based high strength composite material”, *Composite Structures*, vol. 109, p. 294–304, 2014.
- [58] NP EN 1097 - 3, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios, Caparica: Instituto Português da qualidade (IPQ), 2002, p. 16.
- [59] NP EN 206 - 1, Betão, Parte 1: especificação, desempenho, produção e conformidade, Caparica: Instituto Português da qualidade (IPQ), 2007.
- [60] NP EN 12390 - 3, Ensaios do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão de provetes, Caparica: Instituto Português da qualidade (IPQ), 2011.
- [61] NP EN 12390 - 6, Ensaios do betão endurecido, Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes, Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003, p. 14.

- [62] NP EN 1992 - 1, Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão; Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2010.
- [63] S&P Clever Reinforcement Ibérica - Materiais de Construção, Lda., “S&P Resin 220 HP - Adesivo epoxy”, 4 fevereiro 2019. [Online]. Disponível: https://www.sp-reinforcement.pt/sites/default/files/field_product_col_doc_file/pt_resin220hp_04022019.pdf. [Acedido em 25 setembro 2019].
- [64] S&P Clever Reinforcement Ibérica - Materiais de Construção, Lda., “S&P Resin 55 HP - Adesivo epoxy”, 11 setembro 2018. [Online]. Disponível: https://www.sp-reinforcement.pt/sites/default/files/field_product_col_doc_file/pt_resin55hp11.09.18.pdf. [Acedido em 25 setembro 2019].
- [65] S&P Clever Reinforcement Ibérica - Materiais de Construção, Lda., “S&P C-Sheet 240”, 24 julho 2018. [Online]. Disponível: https://www.sp-reinforcement.pt/sites/default/files/field_product_col_doc_file/pt_c-sheet_24024.07.18.pdf. [Acedido em 25 setembro 2019].
- [66] S&P Clever Reinforcement Ibérica - Materiais de Construção, Lda., “S&P ARMO-mesh”, 10 setembro 2018. [Online]. Available: https://www.sp-reinforcement.pt/sites/default/files/field_product_col_doc_file/pt_armo_mesh10.09.18.pdf. [Acedido em 25 setembro 2019].
- [67] S&P Clever Reinforcement Ibérica - Materiais de Construção, Lda., “S&P ARMO-crete w”, [Online]. Disponível: https://www.sp-reinforcement.pt/sites/default/files/field_product_col_doc_file/r_armo-crete_w_pub_tds_prod_sp_armo-crete_w_pt_pt.pdf. [Acedido em 25 setembro 2019].
- [68] BS EN 1015 - 11, Methods of test for mortar masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, Londres: British Standards Institution (BSI), 1999.
- [69] Tokyo Measuring Instruments Lab., “High Sensitive Displacement Transducer”, [Online]. Disponível: <https://www.tml.jp/eng/documents/transducers/CDP.pdf>. [Acedido em 14 maio 2020].

Apêndice - Caracterização da argamassa

Tabela A1 - Resultado dos ensaios de resistência à flexão da argamassa estrutural

Amostra	Peso (g)	Peso médio (g)	F (N)	l (mm)	b (mm)	b _{médio} (mm)	d (mm)	d _{médio} (mm)	f (N/mm ²)	f (N/mm ²)
CA ₁ -01	546,432				40,23		40,28			
	546,431	546,431	3938,12	100,00	40,07	40,15	40,32	40,30	9,06	
	546,431									
	549,175				40,12		40,44			
	549,173	549,172	3030,34	100,00	40,22	40,17	40,67	40,56	6,88	7,9
	549,169									
	539,064				40,57		40,00			
	539,064	539,063	3350,78	100,00	40,44	40,51	40,42	40,21	7,67	
CA ₁ -02	539,062									
	561,513				40,13		40,43			
	561,513	561,514	4121,47	100,00	39,11	39,62	40,51	40,47	9,53	
	561,516									
	565,037				40,95		39,23			
	565,038	565,037	3771,87	100,00	90,97	65,96	39,63	39,43	5,52	8,0
	565,036									
	564,987				39,47		40,7			
CA ₂ -01	564,984	564,985	3901,4	100,00	39,69	39,58	40,87	40,79	8,89	
	564,985									
	540,897				40,64		40,33			
	540,889	540,893	3157,62	100,00	40,41	40,53	40,03	40,18	7,24	
	540,893									
	552,068				40,54		40,39			
	552,066	552,067	3089,49	100,00	40,23	40,39	40,43	40,41	7,03	7,6
	552,067									
CA ₂ -02	546,003				40,38		39,83			
	546,000	546,001	3701,22	100,00	40,35	40,37	40,18	40,01	8,59	
	545,999									
	533,221				40,12		39,53			
	533,222	533,222	3150,61	100,00	40,25	40,19	39,66	39,60	7,50	
	533,222									
	535,134				39,39		38,90			
	535,732	535,532	3391,15	100,00	40,01	39,70	39,24	39,07	8,39	8,0
SA ₂	535,731									
	529,015				39,70		39,08			
	529,011	529,011	3251,26	100,00	40,01	39,86	38,78	38,93	8,07	
	529,007									
	566,823				40,40		40,21			
	566,828	566,826	3919,62	100,00	41,30	40,85	39,94	40,08	8,96	
	566,827									
	555,123				40,34		40,17			
SA ₂	555,126	555,125	3864,95	100,00	41,17	40,76	39,99	40,08	8,86	8,8
	555,126									
	552,077				40,30		40,47			
	552,079	552,077	3823,74	100,00	41,33	40,82	39,85	40,16	8,71	
	552,076									

Tabela A 1 - Resultado dos ensaios de resistência à flexão da argamassa estrutural (continuação)

Amostra	Peso (g)	Peso médio (g)	F (N)	l (mm)	b (mm)	b _{médio} (mm)	d (mm)	d _{médio} (mm)	f (N/mm ²)	f (N/mm ²)
CA ₃ -01	559,237				39,99		39,36			
	559,243	559,242	3043,79	100	40,20	40,10	40,79	40,08	7,09	
	559,245									
	556,918				39,46		40,08			
	556,918	556,917	3217,33	100	41,14	40,30	41,16	40,62	7,26	7,3
	556,916									
	555,235				40,37		39,58			
	555,228	555,23	3167,43	100	40,06	40,22	39,29	39,44	7,6	
	555,226									
	558,024				40,51		39,25			
CA ₃ -02	558,013	558,016	3902,52	100	40,48	40,50	39,61	39,43	9,3	
	558,011									
	559,969				40,81		39,23			
	559,970	559,969	3227,43	100	40,87	40,84	39,27	39,25	7,69	8,7
	559,969									
	557,477				41,25		39,33			
	557,477	557,477	3959,15	100	41,88	41,57	39,40	39,37	9,22	
	557,476									

Tabela A 2 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão da argamassa estrutural

Amostra	v (N/s)	b (mm)	d (mm)	F (kN)	f (N/mm ²)	f (N/mm ²)
CA ₁ -01	CA ₁ -01 - I	200	40,0	40,0	59,0	36,875
		200	40,0	40,0	63,0	39,375
	CA ₁ -01 - II	300	40,0	40,0	68,0	42,500
		300	40,0	40,0	71,0	44,375
	CA ₁ -01 - III	300	40,0	40,0	71,0	44,375
		300	40,0	40,0	72,0	45,000
CA ₁ -02	CA ₁ -02 - I	300	40,0	40,0	78,0	48,750
		300	40,0	40,0	86,0	53,750
	CA ₁ -02 - II	300	40,0	40,0	80,0	50,000
		300	40,0	40,0	78,0	48,750
	CA ₁ -02 - III	300	40,0	40,0	79,0	49,375
		300	40,0	40,0	76,0	47,500
CA ₂ -01	CA ₂ -01 - I	300	40,0	40,0	65,0	40,625
		300	40,0	40,0	73,0	45,625
	CA ₂ -01 - II	300	40,0	40,0	82,0	51,250
		300	40,0	40,0	81,0	50,625
	CA ₂ -01 - III	300	40,0	40,0	83,0	51,875
		300	40,0	40,0	77,0	48,125
CA ₂ -02	CA ₂ -02 - I	300	40,0	40,0	70,0	43,750
		300	40,0	40,0	71,0	44,375
	CA ₂ -02 - II	300	40,0	40,0	76,0	47,500
		300	40,0	40,0	83,0	51,875
	CA ₂ -02 - III	300	40,0	40,0	71,0	44,375
		300	40,0	40,0	82,0	51,250
SA ₂	SA ₂ - I	300	40,0	40,0	68,0	42,500
		300	40,0	40,0	73,0	45,625
	SA ₂ - II	300	40,0	40,0	71,0	44,375
		300	40,0	40,0	78,0	48,750
	SA ₂ - III	300	40,0	40,0	74,0	46,250
		300	40,0	40,0	78,0	48,750
CA ₃ -01	CA ₃ -01 - I	300	40,0	40,0	76,0	47,500
		300	40,0	40,0	80,0	50,000
	CA ₃ -01 - II	300	40,0	40,0	71,0	44,375
		300	40,0	40,0	70,0	43,750
	CA ₃ -01 - III	300	40,0	40,0	69,0	43,125
		300	40,0	40,0	62,0	38,750
CA ₃ -02	CA ₃ -02 - I	300	40,0	40,0	67,0	41,875
		300	40,0	40,0	66,0	41,250
	CA ₃ -02 - II	300	40,0	40,0	68,0	42,500
		300	40,0	40,0	66,0	41,250
	CA ₃ -02 - III	300	40,0	40,0	69,0	43,125
		300	40,0	40,0	73,0	45,625

Anexo – Fichas técnicas

S&P Resin 220 HP

Adesivo epoxi de elevado desempenho



Ref: PT-08.01.26.00

DESCRIÇÃO

A S&P Resin 220 HP é uma resina epoxi bi-componente, sem adição de solventes, tixotrópica, de cor cinzenta, especialmente desenvolvida para colagem estrutural de laminados de fibra de carbono (S&P C-Laminate). As propriedades do adesivo, tanto em estado fresco como endurecido foram testadas no sistema de reforço, e incorporadas no Software de Cálculo S&P FRP Lamella.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

CAMPOS DE APLICAÇÃO

• Colagem por pressão de:

- S&P C-Laminate em superfícies de betão, aço e de madeira
- chapas de aço
- colagens diversas em betão

VANTAGENS DO PRODUTO

- de aplicação imediata (não é necessário filler)
- Tempo de trabalhabilidade adequado
- Elevada tensão de aderência
- Permanece consistente em superfícies verticais e horizontais, como tectos
- Elevada resistência mecânica
- Endurece sem retracção
- Sem adição de solventes
- Impermeável à água e ao vapor de água

DADOS DO PRODUTO

Descrição Genérica

S&P Resin 220 HP

Aparência / Cor

Comp. A – solução de resina epoxi, cor cinzenta clara
Comp. B – endurecedor de resina epoxi, cor preta

Fornecimento

Unidades de: 5 ou 15 kg (Comp. A + Comp. B)

Paletes de: 42 x 5 kg (embalagem) ou 28 x 15 kg (embalagem)

Armazenamento

Comp. A & B: Período de validade de 24 meses, quando armazenados em locais com temperatura entre +10 °C e +25 °C.

Homogeneizar antes de usar; aquecer gradualmente e homogeneizar material congelado ou muito frio.

MARCA-CE



S&P Resin 220 HP é um produto conforme a EN 1504-4 :2005



02.2019

S&P Resin 220 HP

Adesivo epoxi de elevado desempenho



PREPARAÇÃO

Preparação do suporte

O reforço só se efectiva quando o substrato possui uma capacidade resistente mínima de 1,5 N/mm². O substrato deve estar isento de substâncias que possam prejudicar a aderência (óleo, gordura, cera, etc.), e isento de pó. A superfície deve estar limpa, coesa e seca.

Humidade máxima do suporte: 4 %

Betões e argamassas "jovens" devem ter pelo menos 3 a 6 semanas de cura e endurecimento.

Mistura

Mexer os componentes individuais separadamente.

Adicionar o componente A ao componente B e mexer continuamente até que a cor seja cinzento uniforme e a mistura isenta de vestígios.

Colocar a mistura num recipiente diferente, para confirmar a homogeneidade da mistura, ou pôr em evidência as inadequações que possam existir.

Misturar com pá misturadora a baixa rotação (<400 rot/min) para minimizar bolhas de ar na mistura.

APLICAÇÃO

Antes de a resina ser aplicada, a superfície do laminado deve ser limpa com um pano embebido em S&P Cleaner.

Onde necessário, aplicar uma camada de resina com uma espessura de aproximadamente 1 mm sobre o substrato utilizando uma espátula. Aplicar uma camada uniforme com 2-3 mm de espessura sobre o laminado.

Durante o período em que a resina é trabalhável, pressionar o laminado sobre a camada de resina previamente aplicada, de forma uniforme, com um rolo de pressão, até que uma porção da resina surja nos bordos em ambos os lados do laminado. Deverá ficar uma espessura residual mínima de 1 mm; 4 mm é o limite máximo de espessura de resina de colagem. A melhor forma de aplicar a resina é através de um doseador/dispensador S&P.

Após a resina ter endurecido, verificar que a aderência se efectuou ao longo de toda a área batendo sobre a superfície (tap test). A superfície dos laminados pode ser revestida ou pintada, de forma a cumprir critérios estéticos.

Temperatura de Aplicação

- O adesivo é trabalhável de +8 °C a +35 °C.

A temperatura do substrato deve estar pelo menos 3 °C acima da temperatura do ponto de orvalho.

Consumo

- Aproximadamente 1,6 kg/m² por mm de espessura

DADOS TÉCNICOS

S&P RESIN 220 HP Adesivo epoxi	Método de ensaio	Unidades	Desempenho		
Módulo de elasticidade	EN 13412:2008	N/mm ²	≥7100		
Trabalhabilidade (pot-life 23 °C)	Inhouse-Test	Minutos	90		
Resistência à compressão	SN EN 196-1	N/mm ²	≥83		
Coefficiente de expansão térmica	EN 1770:1999	µm/m °C	≥ 40		
Temperatura de transição vítrea (Tg)	EN 12614:2006	°C	58,2		
Retracção lineal	EN 12617-1:2004	%	0,01		
Aderência aço/aço (corte)	EN 12188:2000	N/mm ²	'50° ≥70"	'60° ≥80"	'70° ≥90"
Aderência aço/aço (resistência à tracção)	EN 12188:2000	N/mm ²	≥15		
Relação de mistura		Em peso	2:1 (A:B)		
Temperatura de aplicação		°C	+8 °C to +35 °C		
Seco ao tacto após		Horas	4		
Tempo de endurecimento		Dias	7		

Os resultados dos ensaios foram obtidos em laboratório de acordo com o método e norma indicados

S&P Resin 220 HP

Adesivo epoxi de elevado desempenho



ENSAIOS

Todos os dados técnicos desta ficha baseiam-se em testes laboratoriais. Podem verificar-se desvios aos valores apresentados por circunstâncias fora do nosso controlo.

Contacte-nos para informação detalhada sobre ensaios efectuados.
Estão disponíveis relatórios de ensaio.

LIMPEZA

A mistura não endurecida pode ser removida com S&P Cleaner.

A mistura endurecida apenas pode ser removida através de meios mecânicos.

HIGIENE E SEGURANÇA

As fichas de segurança podem ser obtidas através dos nossos serviços de apoio ao cliente pelo nº de telefone +351 212 253 371 ou email info@reinforcement.pt.

Os produtos da gama S&P são para uso industrial. Devem ser instalados por pessoal especializado e por profissionais competentes com formação adequada. Devem ser seguidas as instruções de instalação adequadas que constam nos manuais de aplicação S&P e nos diversos "Guidelines", documentos / notas técnicas existentes.

É da responsabilidade do dono de obra, seu representante ou empreiteiro determinar a adequação e utilização dos produtos S&P.
Antes de usar qualquer produto S&P deve consultar um profissional qualificado para o aconselhamento técnico sobre os nossos produtos, sendo as informações fornecidas baseadas nos nossos melhores conhecimentos científicos e práticos.
São reservados os direitos à alteração do produto.
São aplicáveis as condições gerais de venda e de transporte.
É considerada válida a versão mais recente da Ficha Técnica disponibilizada pelos nossos serviços técnicos.

Clever Reinforcement Ibérica, Lda
Rua José Fontana, N° 76
P2845-408 Amora
Telefone: +351 212 253 371
Fax: +351 212 252 436
info@sp-reinforcement.pt
www.sp-reinforcement.pt



www.sp-reinforcement.pt



S&P Resin 55 HP

Adesivo epóxi (resina de laminação)



SP-PT.08.01.19.01

DESCRIÇÃO

Resina epóxi bi-componente de elevado desempenho, isenta de solventes, de elevada resistência e elevado módulo, usada para impregnação de mantas e tecidos S&P Sheets e como primário sobre o substrato.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

CAMPOS DE APLICAÇÃO

- A S&P Resin 55 HP é usada como resina de laminação/impregnação e colagem para os seguintes sistemas S&P:
 - S&P C-Sheet
 - S&P G-Sheet
 - S&P A-Sheet
 - C-Laminate slot-applied (inseridos)
- As mantas e tecidos com menos de 400 g/m² podem ser directamente impregnadas sobre o substrato
- Mantas e tecidos com mais de 400 g/m² devem ser pré-impregnadas de resina pelo método wet lay-up.

VANTAGENS DO PRODUTO

- Excelente penetração nas fibras, boa capacidade de impregnação
- Elevada estabilidade
- Excelente aderência ao betão e aço
- Resistente a ácidos diluídos, bases, soluções salinas, óleos minerais e hidrocarbonetos alifáticos
- Resistente a agentes climatéricos

DADOS DO PRODUTO

Descrição Genérica
S&P Resin 55 HP

Cor / aparência

Componente A - Solução de resina epóxi: Líquido/ ligeiramente amarelada

Componente B - Endurecedor para resina epóxi: Viscosa/ ligeiramente amarelada

Fornecimento

Unidades de 6 kg

Densidade

Comp. A: 1,17 kg/l

Comp. B: 0,98 kg/l

Mistura: Approx. 1,15 kg/l

Armazenamento

Componentes A e B - validade de 24 meses, nas embalagens originais à temperatura de +5 °C a +35 °C



01.2018

www.sp-reinforcement.pt



S&P Resin 55 HP

Adesivo epóxi (resina de laminação)



APLICAÇÃO

Aplicável em superfícies com humidade superficial até 4%. As superfícies devem-se encontrar limpas e isentas de óleos, gorduras ou partículas soltas.

A S&P Resin 55 HP é fornecida na relação de mistura prescrita. O Componente B (endurecedor) é misturado no componente A (Resina). É importante que seja utilizado todo o endurecedor. Os dois componentes devem ser misturados usando uma misturadora de velocidade controlada de baixa rotação e com pás misturadoras apropriadas.

Misturar cuidadosamente de forma a remexer junto das paredes e fundo do balde, garantindo a mistura completa do componente B. Após esta operação, a mistura deve apresentar-se homogénea, sem grumos e de cor uniforme.

A temperatura dos dois componentes no momento da mistura deve idealmente estar entre 15 °C a 20 °C.

Temperaturas mais elevadas reduzem consideravelmente o tempo de aplicação.

A S&P Resin 55 HP deve ser protegida de humidade durante 6-8 horas após a aplicação. Caso haja contacto com vapor de água/ humidade durante este período, a superfície ficará branca e pegajosa. Não obstante, a resina sob a superfície tem a capacidade de curar normalmente. Em áreas descoloradas ou pegajosas a aderência a qualquer revestimento é reduzida ou até inviabilizada.

Os valores abaixo indicados consideram +20 °C e 50 % de humidade relativa do ar.

Consumo

Aproximadamente 150 a 1 400 g/m² dependendo da temperatura, porosidade do substrato e sistema S&P Sheet a aplicar (ver manual)

INFORMAÇÃO TÉCNICA

S&P RESIN 55 HP Adesivo epóxi (resina de laminação)	Método de ensaio	Unidades	Desempenho		
Módulo de elasticidade	EN13412:2008	N/mm²	≥ 3 200		
Trabalhabilidade (pot-life)	EN ISO 9514 EN 1542	Minutos	45		
Resistência à compressão	EN 12190:1999	N/mm²	≥100		
Coefficiente de expansão térmica	EN 1770:1999	µm/m °C	60		
Temperatura de transição vítrea (Tg)	EN 12614:2006	°C	53,5		
Retracção linear	EN 12617-1:2004	%	0,02		
Aderência aço/aço (corte)	EN 12188:2000	N/mm²	50° ≥ 50	60° ≥ 60	70° ≥ 70
Aderência aço/aço (resistência à tracção)	EN 12188:2000	N/mm²	15,9		
Alongamento à rotura	ASTM D638	%	1,73		
Relação de mistura		Em peso	4,2 : 1,8 (A:B)		
Temperatura de aplicação		°C	Entre + 8 e + 35		
Seco ao tacto após		Horas	4		
Tempo de endurecimento		Dias	7		

Os resultados dos ensaios foram obtidos em laboratório de acordo com o método e norma indicados

ENSAIOS

Todos os dados técnicos desta ficha baseiam-se em testes laboratoriais. Podem verificar-se desvios aos valores apresentados por circunstâncias fora do nosso controlo.

Contacte-nos para informação detalhada sobre ensaios efectuados.
Estão disponíveis relatórios de ensaio.

S&P Resin 55 HP

Adesivo epóxi (resina de laminação)



MARCA-CE



S&P Resin 55 HP é um produto conforme a EN 1504-4.

LIMPEZA

No caso de interrupção dos trabalhos excedendo os 30 minutos, todas as ferramentas devem ser cuidadosamente limpas e saneadas com S&P Cleaner.

A resina endurecida só poderá ser removida por meios mecânicos.

HIGIENE E SEGURANÇA

As fichas de segurança podem ser obtidas através dos nossos serviços de apoio ao cliente pelo nº de telefone +351 212 253 371 ou email info@reinforcement.pt.

Os produtos da gama S&P são para uso industrial. Devem ser instalados por pessoal especializado e por profissionais competentes com formação adequada. Devem ser seguidas as instruções de instalação adequadas que constam nos manuais de aplicação S&P e nos diversos "Guidelines", documentos / notas técnicas existentes.

É da responsabilidade do dono de obra, seu representante ou empreiteiro determinar a adequação e utilização dos produtos S&P. Antes de usar qualquer produto S&P deve consultar um profissional qualificado para o aconselhamento técnico sobre os nossos produtos, sendo as informações fornecidas baseadas nos nossos melhores conhecimentos científicos e práticos.

São reservados os direitos à alteração do produto.

São aplicáveis as condições gerais de venda e de transporte.

É considerada válida a versão mais recente da Ficha Técnica disponibilizada pelos nossos serviços técnicos.

Clever Reinforcement Ibérica, Lda
Rua José Fontana, N° 76
P2845-408 Amora
Telefone: +351 212 253 371
Fax: +351 212 252 436
info@sp-reinforcement.pt
www.sp-reinforcement.pt



www.sp-reinforcement.pt



S&P C-Sheet 240

Manta em fibra de carbono para reforço de estruturas



SP-PT.08.01.31.01

DESCRIÇÃO

A S&P C-Sheet 240 é uma manta de fibra de carbono uni-direccional com elevada resistência para reforço de estruturas por aplicação wet ou dry lay-up. As mantas S&P C-Sheet são coladas à estrutura que se pretende reforçar usando resina epoxídica (S&P Resin 55 HP ou S&P Resicem HP).

CAPACIDADES GERAIS

CAMPOS DE APLICAÇÃO

REFORÇO DE ESTRUTURAS EM BETÃO, BETÃO ARMADO, ALVENARIA E MADEIRA PARA REFORÇO À FLEXÃO, CORTE E COMPRESSÃO AXIAL

- Aumento da resistência e da ductilidade em pilares e paredes
- Aumento da carga axial por confinamento
- Aumento de carga de serviço
- Substituição de armaduras corroídas ou em falta
- Alterações de utilização
- Eliminação de erros de dimensionamento ou de construção
- Aumento de resistência sísmica
- Incremento de vida útil, aumento da durabilidade
- Adaptação e adequação a novas normas

VANTAGENS DO PRODUTO

- Aplicação flexível, mesmo em superfícies curvas, como apoios, pilares, silos, chaminés, paredes, tectos abobadados, etc.
- Várias larguras e espessuras disponíveis
- Baixo peso próprio e reduzida espessura
- Isento de corrosão
- Tempo de interrupção da normal utilização da estrutura reduzido
- Instalação com baixo ruído e sem vibrações

DADOS DO PRODUTO

Descrição Genérica

S&P C-Sheet 240

Constituição: Fibras de carbono de alta resistência

Densidade: 1,77 g/cm³

Peso da fibra longitudinal: 200 g/m²; 300 g/m²; 400 g/m² e 600 g/m²

Resistência à tracção: $\geq 4\,300\text{ N/mm}^2$ - $\geq 4\,400\text{ N/mm}^2$

Módulo de elasticidade: $\geq 240\text{ kN/mm}^2$

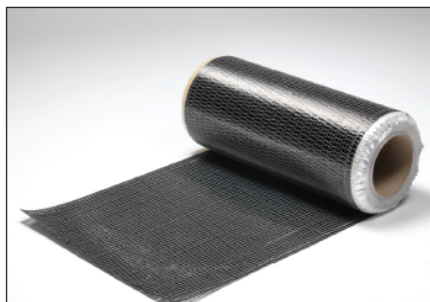
Alongamento à rotura: 1,8 %

Aparência: Cor preta em ambos os lados

Dimensões: 300 mm a 600 mm

Fornecimento: Em rolos de 100 m

Armazenamento: Em local seco e seguro, sem exposição directa ao sol (UV), temperatura armazenamento +5 °C a + 35 °C



05.2018

www.sp-reinforcement.pt



S&P C-Sheet 240

Manta em fibra de carbono para reforço de estruturas



INFORMAÇÃO TÉCNICA

DADOS DA FIBRA	Unid.	C-Sheet 240 200 g/m ²	C-Sheet 240 300 g/m ²	C-Sheet 240 400 g/m ²	C-Sheet 240 600 g/m ²
Módulo de elasticidade*	kN/mm ²	≥240	≥240	≥240	≥240
Resistência à tracção*	N/mm ²	≥4 400	≥ 4 300	≥ 4 300	≥ 4 300
Peso da fibra longitudinal	g/m ²	200	300	400	600
Gramagem, manta	g/m ²	230	330	430	630
Densidade*	g/cm ³	1,77	1,78	1,78	1,78
Alongamento de rotura*	%	1,8	1,8	1,8	1,8
Espessura (peso da fibra/densidade), longitudinal	mm	0,113	0,168	0,225	0,337
Secção teórica da fibra 1000 mm largura, longitudinal	mm ²	113	168	225	337
Factor de redução para o cálculo Recomendação S&P (laminação manual/manta unidirecional)		1,2	1,2	1,2	1,2
Força de tracção para 1000 mm largura com extensão após rotura	kN longitudinal	420	600	800	1.200
Força de tracção de cálculo (Flexão) 1000 mm largura Extensão $\epsilon = 0,6 \%$	kN longitudinal	135	200	265	400
Força de tracção de cálculo (Axial) 1000 mm largura Extensão $\epsilon = 0,4 \%$	kN longitudinal	90	135	180	270
Fornecimento em rolo (Manta especial mediante pedido)		L: 30 / 60 cm C: 100 m	L: 30 / 60 cm C: 100 m	L: 30 / 60 cm C: 100 m	L: 30 cm C: 100 m

* Os valores apresentados estão de acordo com as características da fibra utilizada no fabrico

CONSUMO / DOSAGEM DE ADESIVO EPOXY

Produto	S&P RESIN 55 HP (impermeável ao vapor)	S&P RESICEM HP (permeável ao vapor)
C-Sheet 240 200 g/m ²	~ 600–800 g/m ²	~ 1 100–1 500 g/m ²
C-Sheet 240 300 g/m ²	~ 700–1 000 g/m ²	~ 1 300–1 600 g/m ²
C-Sheet 240 400 g/m ²	~ 900–1 300 g/m ²	~ 1 400–1 800 g/m ²
C-Sheet 240 600 g/m ²	~ 1 000–1 400 g/m ²	~ 1 500–1 900 g/m ²

O consumo do material depende do nivelamento efectuado e da rugosidade do suporte.
Por essa razão o consumo pode ser superior ao indicado na tabela.

S&P C-Sheet 240

Manta em fibra de carbono para reforço de estruturas



CONDIÇÕES DE SUPORTE

A tensão mínima na camada de aderência do substrato é de 1,0 N/mm² ou de acordo com as exigências do cálculo estrutural.

A temperatura da base de suporte tem de ser no mínimo de +8 °C e deve estar 3 °C acima da temperatura do ponto de orvalho.

Ao utilizar a S&P Resin 55 HP (impermeável ao vapor de água), a humidade superficial do betão tem de ser <4 %.

Se utilizar a S&P Resicem HP (permeável ao vapor de água) o conteúdo de humidade do betão pode ser ligeiramente superior, podendo ir até 12 %.

PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Betão e Alvenaria

O substrato deve-se encontrar coeso, seco, limpo e sem poeiras nem partículas soltas, impurezas, óleo, gordura ou outras substâncias que inibam a aderência.

O suporte deve ser preparado mediante procedimento adequado como o desbaste com disco metálico, aplicação de jacto de areia ou jacto de água a alta pressão (> 800 bar). O pó deve ser removido por meio de aspiração.

As reparações do betão ou rectificações de irregularidades podem ser efectuadas previamente com argamassas epoxy S&P Resin 230. Sempre que possível, em aplicações sequenciais de resina, deve-se trabalhar em regime de "húmido-em-húmido".

Caso tal não seja possível, deverá ser criada rugosidade na superfície antes da aplicação da manta de modo a garantir uma boa aderência. Se usar a S&P Resicem HP (permeável ao vapor) para impregnação da manta deve ser utilizada argamassa de reparação e nivelamento de base cimentícia TECNOGROUT-FIB ou S&P Armo-crete® w.

ADESIVO EPOXI

Condições limites de aplicação

- Temperatura do suporte
- Temperatura do ar
- Humidade do suporte
- Ponto de orvalho

Instruções de aplicação

- Misturas
- Tempo de mistura

APLICAÇÃO

Para aplicação da S&P C-Sheet 240, a superfície de suporte deverá ser preparada e verificadas as condições referidas para cada tipo de superfície.

A manta deverá ser impregnada com S&P Resin 55 HP ou S&P Resicem HP, devidamente misturada e dentro do tempo de trabalhabilidade (pot life), com recurso a um rolo de teflon. Alternativamente, para mantas de alta gramagem, pode usar-se S&P máquina de wet lay-up.

O ajuste da manta e espalhamento da resina de impregnação deve ser feito com recurso a espátula de borracha S&P squeeze.

As mantas podem ser revestidas com uma camada promotora de aderência (S&P Resin 55 HP + areia calibrada) para aplicação posterior de base hidráulica ou pintura de base acrílica.

Os trabalhos de reforço deverão ser efectuados por empresas com as necessárias qualificações e experiência.

Cuidados

Para cortar as mantas devem ser usadas tesouras apropriadas.

Nunca dobrar a manta no sentido longitudinal, dobrar apenas no sentido transversal às fibras.

Raio mínimo de arredondamento para aplicação em arestas vivas: > 25 mm.

Sobreposição no sentido das fibras deve ser pelo menos 150 mm. No sentido paralelo à fibra não é necessário sobreposição.

S&P C-Sheet 240

Manta em fibra de carbono para reforço de estruturas



MÁQUINA E FERRAMENTAS DE APLICAÇÃO

S&P Máquina de wet lay up

Para impregnação de mantas de alta gramagem

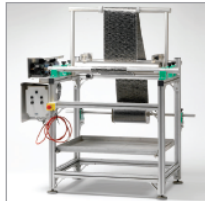
Rolo de laminação S&P (Teflon)

Para laminação de S&P C-Sheets

Disponível à unidade em 3 larguras diferentes (60, 90, 130 mm)

S&P Squeeze (espátula de borracha)

Para ajuste a espalhamento da resina de impregnação.



LIMPEZA

S&P Cleaner

Para limpeza ferramentas e demais equipamentos. Disponível em embalagens de 2, 10 e 25 litros.

Os equipamentos devem ser limpos com S&P Cleaner imediatamente após o seu uso. O material endurecido só poder removido por meios mecânicos.

ENSAIOS

Todos os dados técnicos desta ficha baseiam-se em testes laboratoriais. Podem verificar-se desvios aos valores apresentados por circunstâncias fora do nosso controlo.

Contacte-nos para informação detalhada sobre ensaios efectuados.
Estão disponíveis relatórios de ensalo.

PROTECÇÃO AO FOGO

Protecção ao fogo

Em caso de necessidade as mantas S&P C-Sheet podem ser protegidas contra o fogo, através de placas e argamassas específicas anti-fogo. Existem diversas soluções no mercado dependendo dos requisitos de resistência ao fogo necessários para cada projecto. Existem disponíveis para consulta diversos ensaios de sistemas de protecção ao fogo aplicados aos nossos sistemas de reforço.

Para mais informações consulte os nossos serviços técnicos.

S&P ARMO-mesh®

Malha de reforço em fibra de carbono



SP-PT.08.01.12.01

DESCRIÇÃO

A S&P ARMO-mesh® é uma malha unidirecional ou bidirecional de elevada resistência para reforço estrutural. A S&P ARMO-mesh® é aplicada utilizando a argamassa reactiva S&P ARMO-crete®, por via seca ou húmida (dry ou wet lay-up, respectivamente). Em edifícios históricos, onde é muitas vezes necessário reforço sísmico estrutural, deve ser utilizada a S&P ARMO-mur®, argamassa à base de cal.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

CAMPOS DE APLICAÇÃO

- Diversas possibilidades de aplicação em edifícios, estruturas enterradas, túneis e galerias
- Reabilitação e reforço de materiais existentes combinados com S&P ARMO-crete®
- Garantia de segurança em trabalhos de escavação, abertura de valas ou poços
- Substituição de armaduras de aço corroidas
- Reforço de alvenarias

VANTAGENS DO PRODUTO

- Elevada resistência à tracção
- Sem corrosão
- Baixo peso por unidade de área de malha
- Aplicação simples (e de baixo custo)
- Elevada resistência ao calor
- Elevadas propriedades de aderência com S&P ARMO-crete®
- Reforço eficiente de baixa espessura
- Máxima preservação do gabarito e secção de escoamento (canais)
- Resistência ao fogo (de acordo com a espessura de argamassa)

DADOS DO PRODUTO

Descrição genérica

S&P ARMO-mesh®

Dimensões

S&P ARMO-mesh® L600, L500, L200:

Largura / Comprimento do rolo: 1.95 m / 50 m

S&P ARMO-mesh® 200/200, 500/500:

Largura / Comprimento do rolo: 1.95 m / 50 m

S&P ARMO-mesh® C200:

Largura / Comprimento do rolo: 0.97 m / 50 m

Armazenamento

Na embalagem original, em local fresco, seco e coberto, sem incidência de luz solar directa

Revestimento

Malha revestida com componente reactivo



05.2018

www.sp-reinforcement.pt



S&P ARMO-mesh®

Malha de reforço em fibra de carbono



APLICAÇÃO

Dependendo do processo de aplicação da argamassa (via seca ou húmida), a malha de reforço S&P ARMO-mesh® será embebida na argamassa (húmido-em húmido), ou fixada na primeira camada de argamassa projectada através de elementos de fixação ou grampos de inox. Em ambos os casos, a malha de reforço deve ser recoberta de acordo com os requisitos e regulamentos específicos – ver especificações nas instruções de aplicação das argamassas respectivas.

Corte do Produto

Não cortar S&P ARMO-mesh® com faca. Idealmente, utilizar tesouras Industriais para a realização do corte da malha.

INFORMAÇÃO TÉCNICA

	ARMO-mesh® L600	ARMO-mesh® L500	ARMO-mesh® L200 (directão principal longitudinal) ARMO-mesh® C200 (directão principal transversal)	ARMO-mesh® 200/200	ARMO-mesh® 500/500
Construção (fibra de carbono na direcção principal)	3 x 1 600 tex/ cordão 58,5 cordões / m	2 x 1 600 tex/ cordão 58,5 cordões / m	1 x 1 600 tex/ cordão 50,0 cordões / m	Long. 2 x 800 Transv. 1 x 1 600 tex/ cordão 50,0 cordões / m	Long. 2 x 1 600 Transv. 1 x 3 200 tex/ cordão 58,5 cordões / m
Módulo de elasticidade [kN/mm²]	≥ 240	≥ 240	≥ 240	≥ 240	≥ 240
Factor de redução do módulo de elasticidade na aplicação (recomendação da S&P)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Módulo de elasticidade de cálculo [kN/mm²]	160	160	160	160	160
Resistência à tracção [N/mm²]	≥ 4 300	≥ 4 300	≥ 4 300	≥ 4 300	≥ 4 300
Peso da fibra de carbono na direcção principal [g/m²]	281	187	80	80 (em cada direcção)	187 (em cada direcção)
Densidade [g/cm³]	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78
Extensão de rotura [%]	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Espessura da fibra de carbono Peso da fibra/Densidade [mm]	0,157	0,105	0,044	0,044	0,105
Secção teórica de fibra de carbono para cálculo Na direcção principal [mm²/m]	157	105	44	44	105
Força última de tracção [kN/m]	675	450	185	185	450
Força de tracção de cálculo (recomendação da S&P)					
Flexão (~800 N/mm²) Extensão limite em estado limite último=0,5% [kN/m]	125	84	35	35 (em cada direcção)	84 (em cada direcção)
Axial (~650 N/mm²) Extensão limite em estado limite último=0,4% [kN/m]	102	68	29	29 (em cada direcção)	68 (em cada direcção)

S&P ARMO-mesh®

Malha de reforço em fibra de carbono



SOFTWARE

A S&P disponibiliza guidelines, bem como software de cálculo específico:

- **ARMO flexion** – para o cálculo de reforço de estruturas de betão armado e pré-esforçado
- **ARMO axial** – para o cálculo de reforço de pilares com cargas centradas

Se forem utilizados outros componentes, o resultado de reforço fornecido pelo software não será válido, por erro na utilização de outros materiais desconhecidos para o software S&P. Nestas circunstâncias, a S&P, fornecedora do sistema, declina toda a responsabilidade.

Este software pode ser usado gratuitamente exclusivamente para o dimensionamento do sistema de reforço com produtos S&P. Para aconselhamento e apoio técnico, queira contactar os nossos serviços.

ENSAIOS

Todos os dados técnicos desta ficha baseiam-se em testes laboratoriais. Podem verificar-se desvios aos valores apresentados por circunstâncias fora do nosso controlo.

Contacte-nos para informação detalhada sobre ensaios efectuados.
Estão disponíveis relatórios de ensaio.

HIGIENE E SEGURANÇA

As fichas de segurança podem ser obtidas através dos nossos serviços de apoio ao cliente pelo nº de telefone +351 212 253 371 ou email info@reinforcement.pt.

Os produtos da gama S&P são para uso industrial. Devem ser instalados por pessoal especializado e por profissionais competentes com formação adequada. Devem ser seguidas as instruções de instalação adequadas que constam nos manuais de aplicação S&P e nos diversos "Guidelines", documentos / notas técnicas existentes.

É da responsabilidade do dono de obra, seu representante ou empreiteiro determinar a adequação e utilização dos produtos S&P. Antes de usar qualquer produto S&P deve consultar um profissional qualificado para o aconselhamento técnico sobre os nossos produtos, sendo as informações fornecidas baseadas nos nossos melhores conhecimentos científicos e práticos.

São reservados os direitos à alteração do produto.

São aplicáveis as condições gerais de venda e de transporte.

É considerada válida a versão mais recente da Ficha Técnica disponibilizada pelos nossos serviços técnicos.

Clever Reinforcement Ibérica, Lda
Rua José Fontana, N° 76
P2845-408 Amora
Telefone: +351 212 253 371
Fax: +351 212 252 436
info@sp-reinforcement.pt
www.sp-reinforcement.pt



www.sp-reinforcement.pt



S&P ARMO-crete® w

Argamassa de reparação e colagem (Projectção via húmida)



Ref: SP-PT08.01.07.04

DESCRIÇÃO

A S&P ARMO-crete® w é uma argamassa polímero modificada, à base de ligantes orgânicos, fibras poliméricas e agregados selecionados. O componente reactivo contido na argamassa adere à sílica amorfa que reveste a malha S&P ARMO-mesh® conferindo uma excelente aderência entre a malha e a matriz da argamassa projectada S&P ARMO-crete® w

CARACTERÍSTICAS GERAIS

CAMPOS DE APLICAÇÃO

- Possibilidades de aplicação diversas, em edifícios, estruturas subterrâneas, túneis e galerias
- Reparação e reforço de edifícios existentes em combinação com S&P ARMO-mesh®
- Regularização de superfícies com danos severos de abrasão (estações de tratamento de águas, barragens, etc.)
- Construções reforçadas com fibra S&P ARMO-Glass fibre reinforcement.

VANTAGENS DO PRODUTO

- Excelente aderência a todos os suportes em betão
- Baixo coeficiente de retracção
- Sem cloretos e resistente aos sulfatos
- Fácil aplicação, mesmo com espessura significativa
- Elevada resistência ao fogo, e aos sais de gelo e degelo
- Cumpre os requisitos da norma EN 1504, parte 3, Classe R4
- Elevada resistência à abrasão

DADOS DO PRODUTO

Descrição Genérica

S&P ARMO-crete® w

Aparência

Pó cinzento de argamassa modificada (projectção por via húmida)

Fornecimento

Sacos de 25 kg

Armazenamento

Período de validade de 12 meses a partir da data de produção, desde que acondicionada nas embalagens originais e em lugar seco



MARCA-CE



S&P ARMO-crete® w cumpre de la EN 1504-3 : 2005



S&P ARMO-crete® w

Argamassa de reparação e colagem (Projecção via húmida)



PREPARAÇÃO

Preparação do suporte

O suporte deverá ser preparado com recurso a jacto de areia ou hidro-mecânico (Rugosidade 3-5 mm). O superfície deverá se encontrar limpa, coesa, livre de pó e contaminações tais como óleos e gorduras. Dever-se-á saturar a base com água durante pelo menos 24 horas antes da aplicação da argamassa, de modo a que os poros se saturem (irrigação). A água excedente deve-se retirar com uma esponja, aspiração ou ar comprimido. As armaduras expostas deverão ser tratadas previamente com sistemas anti-corrosivos.

Mistura e procedimentos

Verter de água num balde limpo, de acordo com a consistência pretendida. Adicionar lentamente o conteúdo do saco de 25 kg, misturando a velocidade constante com misturador mecânico, até obter uma mistura homogênea e sem grumos. Deixar a mistura em repouso durante 1 a 2 minutos antes da aplicação. Não adicionar mais água nem remisturar, mesmo que a mistura aparente perda consistência.

APLICAÇÃO

A S&P ARMO-crete® w deve ser aplicada com temperatura entre +5 °C e +30 °C. A argamassa projectada deve ser mantida húmida e protegida do calor e do vento nos 3 a 5 dias seguintes à aplicação. A forma de aplicação mais frequente de S&P ARMO-mesh® é por wet lay up (húmido em húmido). Quando se aplicam duas camadas, a primeira deve ser limpa com jacto de água previamente à aplicação da segunda camada. A S&P ARMO-crete® w pode ser aplicada com equipamento de projecção tradicional ou manualmente. A S&P ARMO-crete® w pode ser utilizada não só como argamassa de nivelamento, mas também em trabalhos de reabilitação estrutural, em combinação com a malha S&P ARMO-mesh®.

Consumo

O consumo depende do tipo de aplicação (em tectos ou paredes), do estado do substrato, e do equipamento de projecção. Como referência para o cálculo de consumo, 20,5 kg/m² por centímetro de espessura.

INFORMAÇÃO TÉCNICA

Propriedades	Método de ensaio	Requisitos segundo a EN 1504-3:2005 para argamassas da classe R4	Valores
Densidade em estado endurecido	-	-	~2,2 kg/dm³
Dosagem de água	-	-	Ver embalagem do produto
Consumo	-	-	~20,5 kg/m² por cm de espessura
Espessura da camada	-	-	5-50 mm (por camada)
Tempo de trabalhabilidade	-	-	40 minutos
Temperatura de aplicação	-	-	5-30 °C
Resistência compressão	EN 12190	≥ 45 N/mm² (28 dias)	≥ 20 N/mm² (1 dia) ≥ 40 N/mm² (7 dias) ≥ 55 N/mm² (28 dias)
Flexotraccão	EN 12190	-	≥ 5 N/mm² (1 dia) ≥ 7 N/mm² (7 dias) ≥ 8 N/mm² (28 dias)
Aderência ao betão	EN 1542	≥ 2,0 N/mm²	≥ 3,0 N/mm²
Aderência ao betão (gelo-degelo)	EN 13687-1	≥ 2,0 N/mm²	≥ 2,5 N/mm²
Resistência à carbonatação	EN 13295	Dk ≤ MC(0,45)	Passa
Módulo de elasticidade	EN 13412	≥ 20000 N/mm²	≥ 25000 N/mm²
Absorção capilar	EN 13057	≤ 0,5 kg/(m²xh0,5)	≤ 0,3 kg/(m²xh0,5)
Teor de cloretos	EN 1015-17	≤ 0,05	0,01%

Os resultados dos ensaios foram obtidos a 20 °C com 65 % de HR

S&P ARMO-crete® w

Argamassa de reparação e colagem (Projecção via húmida)



ENSAIOS

Todos os dados técnicos desta ficha baseiam-se em testes laboratoriais. Podem verificar-se desvios aos valores apresentados por circunstâncias fora do nosso controlo.

Contacte-nos para informação detalhada sobre ensaios efectuados.
Estão disponíveis relatórios de ensaio.

LIMPEZA

Os equipamentos utilizados na aplicação devem ser lavados imediatamente após a utilização.
Após o endurecimento, a remoção de S&P ARMO-crete® w só é possível com recurso a meios mecânicos.

HIGIENE E SEGURANÇA

As fichas de segurança podem ser obtidas através dos nossos serviços de apoio ao cliente pelo nº de telefone +351 212 253 371 ou email info@reinforcement.pt.

Os produtos da gama S&P são para uso industrial. Devem ser instalados por pessoal especializado e por profissionais competentes com formação adequada. Devem ser seguidas as instruções de instalação adequadas que constam nos manuais de aplicação S&P e nos diversos "Guidelines", documentos / notas técnicas existentes.

É da responsabilidade do dono de obra, seu representante ou empreiteiro determinar a adequação e utilização dos produtos S&P.
Antes de usar qualquer produto S&P deve consultar um profissional qualificado para o aconselhamento técnico sobre os nossos produtos, sendo as informações fornecidas baseadas nos nossos melhores conhecimentos científicos e práticos.
São reservados os direitos à alteração do produto.
São aplicáveis as condições gerais de venda e de transporte.
É considerada válida a versão mais recente da Ficha Técnica disponibilizada pelos nossos serviços técnicos.

Clever Reinforcement Ibérica, Lda
Rua José Fontana, Nº 76
P2845-408 Amora
Telefone: +351 212 253 371
E-Mail : info@sp-reinforcement.es
Fax: +351 212 252 436
info@sp-reinforcement.pt
www.sp-reinforcement.pt



www.sp-reinforcement.pt